

# Untersuchungen zum Fließverhalten des Formstoffs bei dreiaxialer Vibrationsverdichtung

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Wolfgang Simon

geboren am 26.05.1953 in Dresden

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast, Freiberg  
Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Tilch, Freiberg  
Dr.-Ing. Gunther Stehr, Kurort Hartha

Tag der Verleihung: 19.10.2006

## **Inhaltsverzeichnis**

|  |              |
|--|--------------|
| <b>1. Einleitung und Zielstellung</b>  | <b>S. 4</b>  |
| <b>2. Literaturlauswertung zum Stand der Technik</b>                         | <b>S. 4</b>  |
| <b>2.1. Verfahrensschritte des Lost-foam-Verfahrens</b>                      | <b>S. 6</b>  |
| 2.1.1. Modellherstellung   | S. 7         |
| 2.1.2. Schlichten  | S. 9         |
| 2.1.3. Einformen   | S. 10        |
| 2.1.4. Formfüllung   | S. 11        |
| <b>2.2. Varianten des Vollformgießverfahrens</b>                             | <b>S. 13</b> |
| <b>2.3. Vor- und Nachteile</b>   | <b>S. 14</b> |
| <b>2.4. Entwicklungstendenzen</b>  | <b>S. 16</b> |
| <b>2.5. Einflussparameter bei der Vollformherstellung</b>                    | <b>S. 18</b> |
| 2.5.1. Stoffparameter  | S. 18        |
| 2.5.2. Maschinenparameter  | S. 19        |
| 2.5.3. Prozessparameter  | S. 20        |
| <b>2.6. Aktuelle Entwicklungstendenzen</b>                                   | <b>S. 24</b> |
| 2.6.1. Vibrationstisch   | S. 24        |
| 2.6.2. Sensoren zur Untersuchung der Verdichtungseigenschaften – Messprinzip | S. 26        |
| <b>2.7. Analyse der Literaturlauswertung – Problemstellung</b>               | <b>S. 27</b> |
| <b>3. Eingesetzte Messtechnik</b>  | <b>S. 30</b> |
| <b>3.1. Dichtemessungen</b>  | <b>S. 33</b> |
| 3.1.1. Kalibrierung der Sensoren   | S. 34        |
| 3.1.2. Linearität der Sensoren   | S. 36        |
| <b>3.2. Beschleunigungsmessungen</b>   | <b>S. 38</b> |
| <b>4. Vibrationsuntersuchungen</b>   | <b>S. 39</b> |
| <b>4.1. Glaskugelproblematik</b>   | <b>S. 39</b> |
| 4.1.1. Aufgabenstellung  | S. 40        |
| 4.1.2. Überprüfung der Sensoren  | S. 40        |
| 4.1.3. Überprüfung der Verdichtbarkeit                                       | S. 39        |
| 4.1.4. Prüfkörper/Modelle  | S. 40        |
| 4.1.5. Waagerechte Einformlage   | S. 44        |
| 4.1.6. Senkrechte Einformlage  | S. 48        |
| <b>4.2. Untersuchungen zur Eigenfrequenz</b>                                 | <b>S. 50</b> |
| <b>4.3. Betriebliche Untersuchungen</b>                                      | <b>S. 51</b> |
| 4.3.1. Aufgabenstellung  | S. 51        |
| 4.3.2. Beschreibung der vorhandenen Versuchsanlage                           | S. 50        |
| 4.3.3. Versuchsdurchführung  | S. 55        |

|   |        |
|---|--------|
| 4.3.3.1. Einflussgrößen                               | S. 55  |
| 4.3.3.2. Beschleunigungsmessungen                     | S. 60  |
| 4.3.3.3. Verdichtungsmessungen                        | S. 72  |
| 4.3.3.4. Gießversuche                                 | S. 75  |
| 4.4. Untersuchungen zum Einschwingverhalten           | S. 77  |
| 4.4.1. Versuchsdurchführung                           | S. 79  |
| 4.4.2. Versuchsauswertung                             | S. 79  |
| 5. 3-D-Vibration                                      | S. 85  |
| 5.1. Versuchsstand                                    | S. 86  |
| 5.2. Voruntersuchungen                                | S. 87  |
| 5.2.1. Ermittlung der Erregerfrequenzen               | S. 87  |
| 5.2.1.1. Versuche ohne Behälter                       | S. 88  |
| 5.2.1.2. Versuche mit leerem Behälter                 | S. 91  |
| 5.2.1.3. Versuche mit halb vollem Behälter            | S. 94  |
| 5.2.1.4. Versuche mit vollem Behälter                 | S. 97  |
| 5.2.1.5. Ermittelte Erregerfrequenzen                 | S. 98  |
| 5.3. Verdichtungsversuche                             | S. 101 |
| 5.3.1. Modelleinformung                               | S. 102 |
| 5.3.2. Vorversuche                                    | S. 103 |
| 5.3.2.1. Waagerechte Einformlage                      | S. 103 |
| 5.3.2.2. Senkrechte Einformlage                       | S. 105 |
| 5.3.3. Statistische Versuchsplanung und -durchführung | S. 106 |
| 5.3.3.1. Waagerechte Einformlage                      | S. 107 |
| 5.3.3.2. Senkrechte Einformlage                       | S. 113 |
| 5.3.3.3. Zusammenfassung                              | S. 119 |
| 6. Fazit und Ausblick                                 | S. 120 |

Quellenverzeichnis

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenbau der TU Bergakademie Freiberg.

Mein besonderer Dank für die Möglichkeit der Durchführung der Arbeit sowie für die gewährte Förderung und Unterstützung gilt Herrn Professor Dr.–Ing. habil. J. Bast, Inhaber des Lehrstuhls für Hütten-, Gießerei- und Umformmaschinen.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls HGUM und des Gießerei–Institutes für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit und für die nützlichen Hinweise, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Der besondere Dank hierbei gilt Herrn Klaus Löser für die Hilfestellung bei den Versuchsvorbereitungen und –ausführungen sowie Herrn Uwe Engmann für die Anpassung der Messtechnik und der Software an die zu erfassenden und auszuwertenden Messwerte.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meiner Frau, auf deren Verständnis und Beistand ich mich jederzeit verlassen konnte.



## **1. Einleitung und Zielstellung**

Beim Lost-Foam-Verfahren wird im entscheidenden Maße die Qualität der hergestellten Gussteile von der Formherstellung beeinflusst. Diese umfasst das Befüllen des Formbehälters mit Sand und die durch die Behältervibration induzierte Sandverdichtung. Die dabei erzeugte Form soll in allen Bereichen fest und stabil sein, um dem metallostatistischen Druck während des Gießens ausreichend Widerstand leisten zu können /1/. Die Stabilität der Form aus ungebundenem Quarzsand hängt entscheidend von seiner erreichten Packungsdichte ab /2/.

Sowohl die erzielbare Verdichtung als auch die erforderliche Befüllung vorhandener Hohlräume und Hinterschneidungen hängen davon ab, wie es gelingt, den Formsand (in die „richtige Richtung“) in Bewegung zu versetzen. In den Betrieben werden die notwendigen Prozessparameter bei der Formherstellung im Regelfall auf empirischer Weise nach dem „trial and error“-Prinzip ermittelt, die bei jedem Wechsel im Produktionsprogramm zu langen und Kosten aufwändigen Vorversuchen führen. Dass die systematische wissenschaftliche Untersuchung zu dieser Problematik noch in den Anfängen steckt und noch keine Theorie entwickelt worden ist, um die Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von ungebundenen Sanden allumfassend und lückenlos zu beschreiben, könnte an der Art des gewählten Ansatzes liegen. Die Sandbewegung findet als dreidimensionaler, d. h., räumlicher Vorgang statt und bisher wurde meist nur in einer Richtung, seltener in Zweien, vibriert. Um nun dieser räumlichen Bewegung tatsächlich zu entsprechen, ist es durchaus als sinnvoll zu betrachten, den Behälter in drei zueinander senkrecht stehenden Achsen mit wechselnden Frequenzen und Amplituden zu vibrieren, dabei die Transport- und Verdichtungsvorgänge in einem Modellhohlraum zu beobachten und die sich ergebenden Abhängigkeiten und wechselseitigen Beeinflussungen zu ermitteln.

Mit der vorliegenden Arbeit sollen nun die Notwendigkeit der Einführung der 3-D-Vibration in das Vollformgießverfahren begründet und mit den erzielten Versuchsergebnissen die Grundlagen geschaffen werden, um darauf aufbauend einen in der Fertigung einsetzbaren 3-D-Tisch konstruieren und bauen zu können.

## **2. Literaturlauswertung zum Stand der Technik /3/**

Das „Vollformgießen“ bzw. „Full Mold Casting“ (amerikanisch) wurde 1956 mit den ersten Hinweisen auf das Verfahrensprinzip in der Zeitschrift Foundry publiziert. 1958 erhielt der

Erfinder und erste Anwender H. F. Shroyer /4/ darauf das US–Patent Nr. 2.830.343. Er verwendete erstmals einen neuartigen Werkstoff in Form von leichten, vergasbaren Schaumstoffmodellen. Diese neuen Formteile sind leicht bearbeitbar, verbleiben beim Gießen in der Form und werden durch das einströmende Gießmetall vergast. Im Ergebnis entsteht ein mit dem Modell identisches metallisches Bauteil. Mit dem Vollformgießen war somit ein Verfahren gefunden worden, das das Gießen kompliziert gestalteter Teile wesentlich erleichtert bzw. erst ermöglicht hat.

Auf Grund dieser Möglichkeiten konnte man bei Gestaltung der Bauteile kreativer und schöpferischer herangehen, die ersten produzierten Teile waren ausschließlich einzeln oder in Kleinserie gefertigte Kunstguss–Plastiken. Interessant für die industrielle Nutzung wurde das Verfahren mit der Möglichkeit, große Maschinenteile oder Presswerkzeuge zu gießen, die in Einzelgussstücken gefertigt wurden und noch werden. Die Vorzüge wurden von Anwendern rasch erkannt, und es gab schon früh erste Überlegungen über den Einsatz des Verfahrens in der Serienfertigung. Für die Wirtschaftlichkeit der Einführung der Serienfertigung beim Vollformgießen mussten aber noch die dafür notwendigen technischen und technologischen Voraussetzungen entwickelt werden.

Denn anfangs wurden die einzelnen Teile aus großen Blöcken herausgesägt, gefräst oder mit Heizdraht geschnitten und später erst die Modelle selbst in der zu gießenden Gestalt des Bauteiles geschäumt. Das Einbetten der Modelle erfolgte in Kunstharz gebundenen Sand. Die Vorgänge beim Gießen, beim Vergasen des Modells waren zu Beginn der Entwicklung im Detail nicht bekannt, so dass mehr oder weniger nach der Versuch–Irrtum–Methode gegossen wurde.

1962 wurde das Verfahren in Deutschland anlässlich der GIFA (Düsseldorf) der Fachwelt vorgestellt, die Verfahrensentwicklung wurde von A. Wittmoser /5, 6/ in Zusammenarbeit mit der Fa. Grünzweig & Hartmann (Ludwigshafen) entscheidend voran getrieben. Patente von H. Nellen (1960) /7/ und T. R. Smith (1964) /8/ waren weitere Meilensteine in der Entwicklung, denn sie führten zum Einfüllen der Modelle den ungebundenen Sand ein und wiesen den Weg zum Arbeiten mit trockenem und Binderlosem Sand.

Heute werden für das Vollformgießen in ungebundenem Sand verschiedene Begriffe gleichberechtigt nebeneinander verwendet: „Expendable Pattern Casting (EPC)“, „Lost Foam Process“, „Vollformgießen von Seriengussteilen in ungebundenem Sand“.

1966 wurde R. Hofmann ein Patent zum Magnetformverfahren /9/ und 1968 E. M. Krzyzanowski zum Unterdruck-Vollformgießen /10/ erteilt, die ein Magnetfeld bzw. angelegten Unterdruck zur Verfestigung des Formstoffes während des Gießens herangezogen haben.

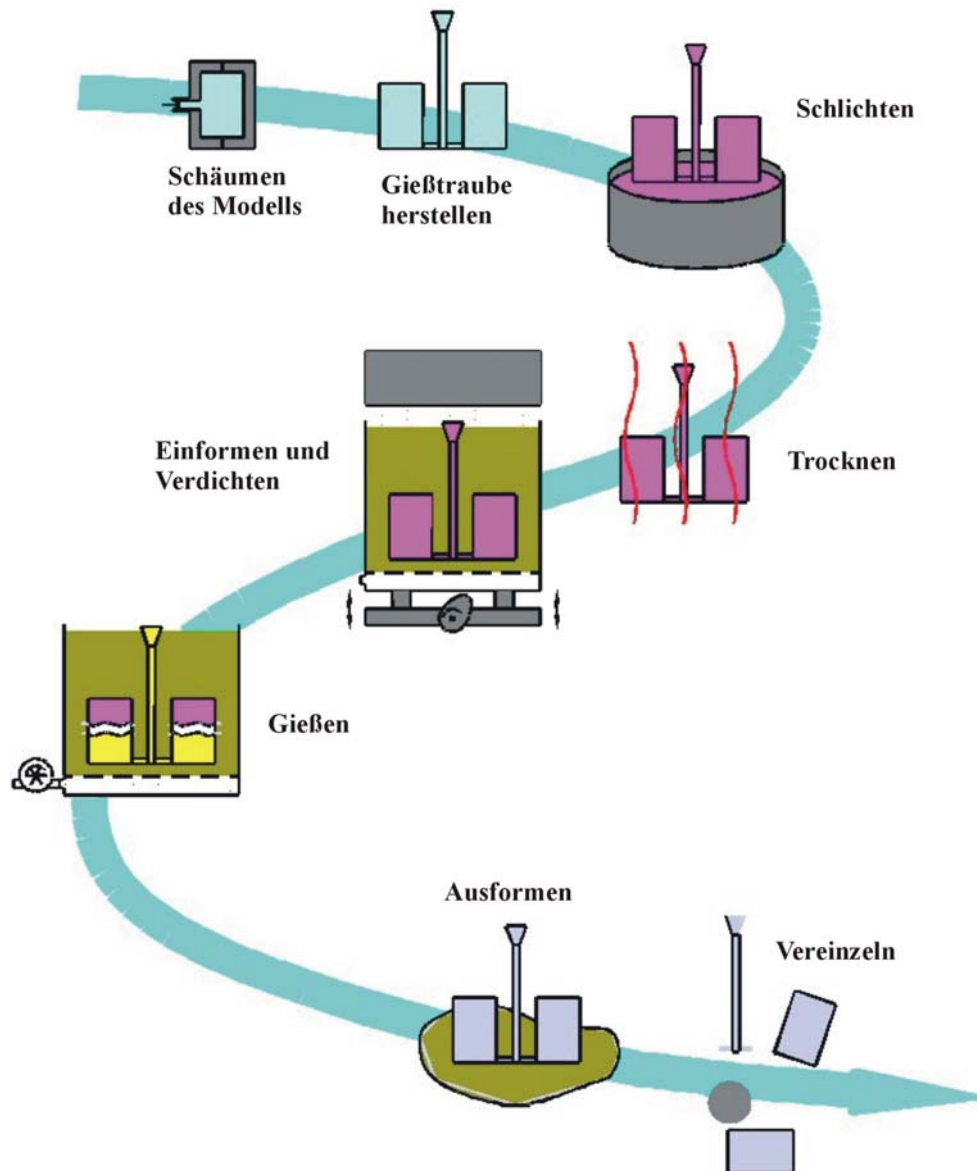
Mitte der 70er Jahre erstarkte das Interesse an der Serienfertigung mit geschäumten Modellen, da erstens das Grundpatent auslief und zweitens die Automobilhersteller wegen der Ölkrise den Fertigungsmöglichkeiten für leichtere Bauteile aufgeschlossener gegenüber standen.

## **2.1. Verfahrensschritte des Lost-Foam-Verfahrens /11/**

Die Verfahrensentwicklung in Richtung Serienfertigung von komplizierten und qualitativ hochwertigen Gussteilen führte auch aus ökonomischen Gründen zum Bestreben, eine möglichst große Anzahl Gussstücke mit einem Abguss zu erhalten. Durch den Zusammenbau mehrerer Modelle zu Modelltrauben wird dieser Zielstellung Rechnung getragen. Diese Trauben werden mit einer speziellen Feuer festen Schlichte umgeben und in einem Formbehälter mit ungebundenen Sand eingebettet. Das Einfüllen der Modelltraube erfolgt durch das Vibrieren des Formbehälters /11/.

Die einzelnen Verfahrensschritte im Überblick:

1. Die vergasbaren Schaumstoffmodelle werden in Schäumformen hergestellt und durch Kleben zu Modelltrauben zusammengefasst und die so entstandene Traube mit einem Gießsystem verbunden (geklebt). Das Ganze wird geschichtet und anschließend getrocknet.
2. Die Modelle werden in einem Formbehälter eingebracht und mit Binder losem, trockenem Quarzsand umhüllt.
3. Der Behälter wird in Vibration versetzt. Dadurch erreicht man ein Auffüllen der Hohlräume und Hinterschneidungen des Modells mit dem Sand. Gleichzeitig wird der Sand durch die eingeleitete Vibrationsenergie verdichtet.
4. Die fertige Vollform wird abgegossen. Die einströmende Schmelze vergast das Modell und nimmt den frei werdenden Hohlraum ein.
5. Nach dem Abkühlen wird der Formbehälter entleert. Die Gussstücke lassen sich leicht vom Sand trennen. Ihre Nachbehandlung (Putzen) ist auf ein Minimum begrenzt.



**Bild 1: Ablaufschema beim Vollformgießen /3/**

6. Der Sand wird gekühlt und gesichtet. Nach diesen relativ einfachen Aufbereitungsoperationen kann er wieder verwendet werden (Formstoffkreislauf).

### **2.1.1. Modellherstellung /12/**

Die Schäumtechnik ist ein sehr wichtiger Bestandteil des Lost-Foam-Gießens und sollte deshalb von jedem Gießer die entsprechende Beachtung finden. Der Schäumprozess besteht im Wesentlichen aus drei Schritten:

1. Vorschäumen der Schaumstoffperlen
2. Trocknen der Schaumstoffperlen

### 3. Schäumen des Modells in der Schäumform

Nach dem Schäumen schwinden die Schaumstoffe, da Feuchte und Treibgas entweichen. Diese Schwindung ist Zeit abhängig. Nähere Untersuchungen hierzu haben Hahn, O. /13/ u. a. durchgeführt. Bei der Konstruktion der Schäumwerkzeuge ist die Schwindung durch ein Aufmaß zu berücksichtigen. Die Gussteilqualität hängt, bezogen auf das Schaumstoffmodell, von folgenden Faktoren ab: Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität der Schaumstoffmodelle, Perlenverschweißung am Rand und im Inneren der Modelle, Materialtyp, Anteil der flüchtigen Bestandteile und Rohdichte.

**Polystyrol** (EPS) ist weiß und hat eine Dichte von 16 bis 20 g/dm<sup>3</sup>. Es besteht zu 92 % aus Kohlenstoff und zu 8 % aus Wasserstoff (Masseanteile). Der Nachteil dieses Schaumstoffes ist, dass er vor allem beim Gusseisen im Gussstück zur Ausbildung von Glanzkohlenstoff führt /12, 14/. Die Qualität eines EPS-Schaumstoffes lässt sich nach Aussage von Lessiter /15/ dadurch verbessern, dass Molekulargewicht, Pentananteil und Beschichtung reduziert werden.

**Poresta blau** hat eine hellblaue Färbung und eine Dichte von 18 bis 22 g/dm<sup>3</sup>. Durch organische Zusätze ist es besser vergasbar als Polystyrol. Dadurch kommt es aber zu einer stärkeren Gasentwicklung, die beim Gießprozess beachtet werden muss. Ein Nachteil dieses Werkstoffes liegt darin, dass er stark hygroskopisch ist. Das aufgenommene Wasser wirkt sich bei der Vergasung des Schaumstoffes negativ auf den Formfüllprozess aus.

**PMMA** (Polymethylmethacrylat) hat eine Dichte um 25 g/dm<sup>3</sup>. Es wird vor allem beim Eisenguss eingesetzt, weil es dort zu geringeren Kohlenstoffabscheidungen führt. Die Verbrennungsprodukte dieses Schaumstoffes sind nach Walter /14/ nur Kohlendioxid und Wasser. Die Nachteile von PMMA sind die hohen Modellkosten und eine starke Gasentwicklung.

**Copolymere** weisen Styrol und Methylmethacrylat in einem Molekül auf. Das Material Clearpor CL 600 enthält 75 % MMA, 18 % Styrol und 7 %  $\alpha$ -Methylstyrol. Seine Dichte beträgt ca. 21,4 g/dm<sup>3</sup> /16/.

**PAC** ist eine amerikanische Neuentwicklung /15/ und ist ein Polyalkylcarbonat, ein Polymer mit einem besonders niedrigem Kohlenstoffgehalt /17/. Deshalb führt PAC zu einer reduzierten Glanzkohlenstoffbildung beim Eisenguss. Seine Dichte liegt zwischen 24 und 48 g/dm<sup>3</sup> /16/.

Die **Schaumstoffdichte** wirkt sich stark auf den Formfüllprozess beim Lost-Foam-Gießen aus, da sie unter anderem die entstehende Flüssigkeits- und Gasmenge bestimmt. Nach Walter, C. /14/ führt eine hohe Schaumstoffdichte zu einer glatten Gussteiloberfläche, weniger Beschädigungen am Schäumling selber, einer höheren Widerstandsfähigkeit des Schäumlings beim Verdichten sowie einer höheren Steifigkeit des Modells. Diese ist wichtig, damit es beim Schlichten seltener zu Abplatzungen der Schlichte kommt. Dagegen bewirkt eine geringere Schaumteildichte eine schwächere Gasentwicklung und somit weniger Fehler im Gussstück. Bei der Produktion der Schäumlinge muss also ein Kompromiss gefunden werden: Der Schäumling soll ausreichend widerstandsfähig für eine gute Handhabung im Prozess sein, andererseits muss er für eine verminderte Fehleranfälligkeit der Gussstücke eine möglichst geringe Dichte haben.

Schaumstoffmodelle sind oft durch variierende Dichte und Perlenverschweißung gekennzeichnet. Diese resultieren aus Werkzeugaufbau, Schäumvorrichtung, Perlenvorschäumen oder Unterschieden in den Wanddicken eines Modells. Unterschiede der Schaumstoffeigenschaften führen zu veränderten Formfüllgeschwindigkeiten und Schmelzefrontprofilen. Sie beeinflussen Turbulenzen und den Transport von Luft und Zersetzungsprodukten während der Formfüllung /18/. Große Abweichungen der Schaumstoffeigenschaften innerhalb eines Modells führen so zu Fehlern.

### **2.1.2. Schlichten /12/**

Die Schlichten beim Lost-Foam-Gießen haben nicht nur die Aufgabe, flüssige Zersetzungsprodukte aufzunehmen und gasförmige Bestandteile abzuführen, sie stützen auch den Sand in der kurzen Phase ab, in der der Schaumstoff vergast, die Metallfront aber noch nicht eingetroffen ist /19, 20/. Zusätzlich verbessern sie die Qualität der Oberflächen und die Maßhaltigkeit der Gussstücke /21/. Schlichten mit guten Isoliereigenschaften wirken sich auf die Formfüllung vor allem beim Aluminiumguss positiv aus, da der Temperaturverlust der Schmelzefront vermindert wird /22/.

Eine Schlichte setzt sich aus feuerfesten Bestandteilen, Dispersionsmittel, Binder, Thixotropiezusätzen und einem Trägermedium zusammen /23/. Die Gasdurchlässigkeit der Schlichte wird durch die Größe, Größenverteilung und die Form der feuerfesten Bestandteile wie Siliziumdioxid, Aluminiumoxid (Tonerde), Zirkon, Chromit und Aluminiumsilikate wie Mullit und Pyrophyllit bestimmt. Durch Zusätze von Kaolin oder Glimmer zu handelsüblichen Schlichten kann man die Gasdurchlässigkeit und die thermische Leitfähigkeit variieren. Die

Anforderungen an eine Schlichte variieren mit jeder neuen Anwendung. Bei Eisenguss ist vor allem die Gasdurchlässigkeit der Schlichte von Bedeutung, im Aluminiumguss hingegen ist das Absorptionsvermögen für großmolekulare Zersetzungsprodukte besonders wichtig /24/. Zusätzlich bestimmen geometrische Faktoren wie Wanddicke und Materialanhäufungen im Modell die gewünschten Schlichteeigenschaften /25/. Durch den großen Einfluss der Schlichte auf die Gussteilqualität sollte sie für jeden Anwendungsfall in Zusammenarbeit von Gießerei und Lieferant angepasst werden.

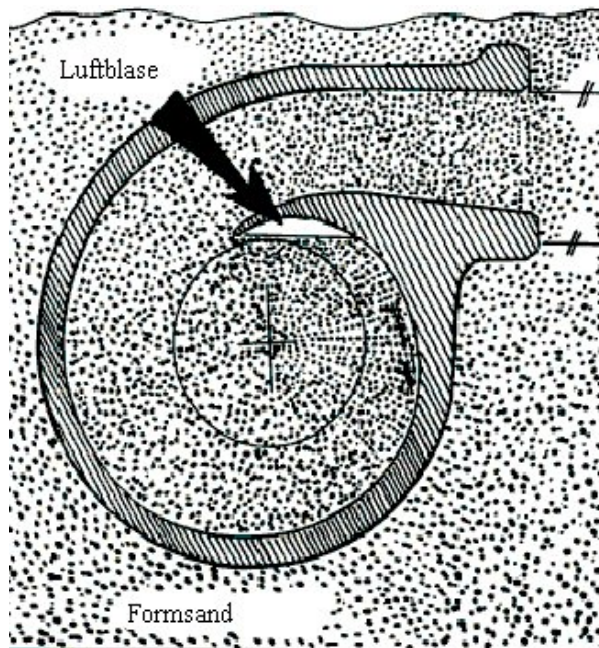
Die geschlichteten Modelle werden meist in einem Umluftofen 5 bis 8 h bei 50 bis 60 °C getrocknet. Ein gleichmäßiges Trocknen bei diesen Temperaturen verhindert Abplatzungen oder ein Einreißen der Schlichte.

Bei den **Schlichteschichtdicken** ist wie bei den Schaumstoffdichten ein Kompromiss zu finden. Ist eine Schlichteschicht zu dick, reißt sie ein, und Penetrationen treten auf /14, 25/. Außerdem ist die Gasdurchlässigkeit einer dicken Schlichteschicht gering, so dass es vermehrt zu Gaseinschlüssen im Gussstück kommt. Eine weitere Wirkung ist wegen der eingeschränkten Gasabfuhr eine stark verlangsamte Formfüllung, im Extremfall läuft das Gussstück nicht vollständig aus. Die geringe Formfüllgeschwindigkeit führt zudem häufig zu Gussfehlern wie Kaltläufen, Falten und Überlappungen. Ist die Schlichteschicht zu dünn, hält sie den im Spalt zwischen Schmelzefront und festen Polystyrol entstehenden Gasdruck nicht stand, es kommt zu Sandeinbrüchen und Penetrationen. Die durch eine dünne Schlichteschicht beschleunigte Formfüllung birgt weiterhin die Gefahr von Gaseinschlüssen auf Grund einer zu hohen Formfüllgeschwindigkeit. Werden Drücke an den Gießbehälter angelegt, so muss die Schlichteschichtdicke erhöht werden, um dem erhöhten mechanischen Druck Stand zu halten.

### 2.1.3. Einformen

Beim Vollformgießen wird heute vor dem eigentlichen Einformen in den Formstoffbehälter erst eine Grund- oder Bettschicht (ca. 20 cm) eingefüllt und der trockene, Binder lose Sand verdichtet. Auf dieser verdichteten Schicht wird dann die geschlichtete Modelltraube positioniert. Anschließend wird der eigentliche Einform- und Verdichtungsprozess eingeleitet, um das Modell mit dem Sand allseitig, gleichmäßig und mit hoher Dichte /11, 19/ zu umhüllen.

Dabei sollen durch die Fluidisierung und den Transport des Sandes alle Hinterschneidungen und Modellhohlräume (die sogenannten „Problemzonen“ – **Bild 2**) mit verdichtetem Sand erreicht werden.



**Bild 2: Ungenügende Formstoffumhüllung  
am Beispiel des Pumpengehäuses**

Mit der Sandverdichtung soll der Widerstand der Gießform gegen die Deformation bzw. das Treiben der Form unter der Wirkung des metallostatistischen Druckes erhöht werden. Durch eine höhere Formstabilität wird neben der Verhinderung des Formkollapses beim Gießen die Penetration der Schmelze in den Sand verhindert /11, 26/.

Wie damit angedeutet, hat das gewählte Sandbefüllungs- und -verdichtungsregime einen großen Einfluss auf die erreichbare Qualität des mit dem Vollformgießverfahren herzustellenden Gussstückes. Deshalb wird unter dem Pkt. 3. ff auf diese Problemstellung noch vertiefend eingegangen.

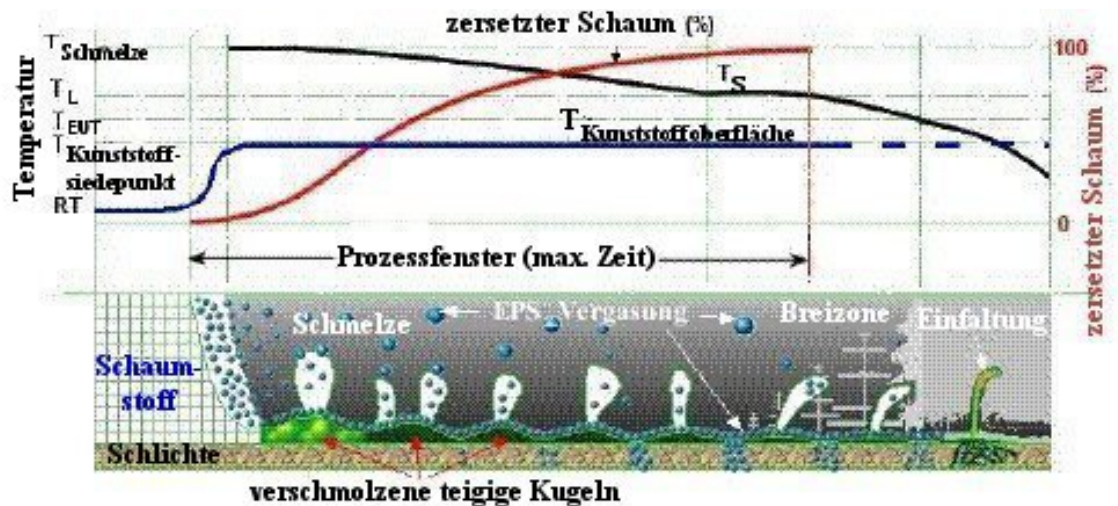
#### 2.1.4. Formfüllung

Beim Vollformgießverfahren wirkt der sich zersetzende Schaumstoff als Widerstand gegen den Metallstrom und führt damit zu einer deutlich verminderten Fließgeschwindigkeit gegenüber den Hohlformgießverfahren /12/. Des weiteren hat die bei den anderen Gießverfahren übliche fallende Gießlage Turbulenzen bei der Formfüllung und damit letztendlich vermeidbare Gießfehler zur Folge. Die Gründe für die beim Vollformgießen bevorzugte horizontale oder steigende Gießlage sind in den Details des Formfüllprozesses zu finden.

Da für die Zersetzung des Schaumstoffes Energie benötigt wird, ist beim Lost-Foam-Guss der Temperaturverlust höher als beim konventionellem, Ton gebundenem Sandguss /12/. In Abhängigkeit von der Temperatur der Schmelze, die wiederum vom Gießwerkstoff abhängig ist, lassen sich die Prozessabläufe in prinzipiell zwei Varianten differenziert darstellen:

- Beim **Aluminiumguss (Bild 3)** ist oftmals die Schaumstoffzersetzung unvollständig und Ursache von sich in Folge von EPS-Einschlüssen bildenden Gussfehlern. In der Literatur /27/ werden diese Fehler als „folds“ (Einfaltungen?, Einschlüsse??) bezeichnet und ihre Entstehung wie folgt beschrieben: Auf Grund der Hitzeeinwirkung des (im **Bild 3** von rechts) einströmenden Metalls kollabiert der EPS-Schaum und ballt sich auf der Schlich-

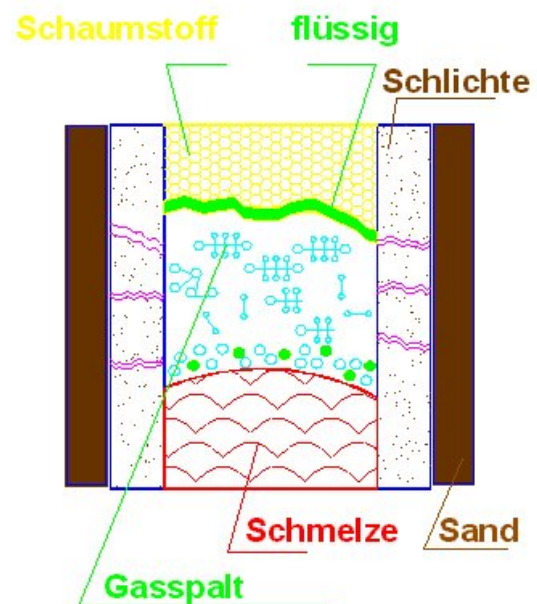




**Bild 3: Schema der Schaumstoffzersetzung beim LF-Verfahren (Al) – „fold“-Bildung /27/**

teschicht zu teigigen „Kugeln“ zusammen. Beim Durchgang der Schmelzefront erhöht die rasche Wärmeübertragung vom Metall zum Kunststoff die Oberflächentemperatur des eingeschlossenen Kunststoffes auf seinen „scheinbaren Siedepunkt“ ( $\sim 425\text{ °C}$ ) /28/, die zu einer intensiven Vergasung führt. Durch die entstehenden Gase bildet sich auf Grund eines ausreichend hohen Dampfdrucks ein Gasspalt zwischen Metall und Kunststoff. Die Vergasungsprodukte entweichen einerseits durch die durchlässige, nicht mit abgebautem Kunststoff bedeckte Schlichteschicht oder bilden andererseits im geschmolzenen Metall Blasen, die wie auch unzersetzte Schaumstoffreste vom erstarrenden Metall eingeschlossen werden und diese „Einfaltungen“ bilden.

- Beim **Gusseisen** (Bild 4) schmilzt der Schaumstoff, die Zellstruktur bricht zusammen; aber bei der Zersetzung bildet sich die flüssige (dünne) Phase an der Modelloberfläche und zusätzlich entstehen gasförmige Zersetzungsprodukte /29/. Diese strömen durch den sich bildenden Spalt weiter durch die Schlichte und kondensieren in entfernteren Sandschichten /30/. Die Zersetzung des Schaumstoffs erfordert einen erheblichen Wärmeabfluss von der Schmelzefront. Der Ver-



**Bild 4: Thermische Auflösung eines Schaumstoffmodells /14/**

lauf der Schaumstoffzersetzung in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt am Beispiel EPS /22, 31–33/ ergibt sich zu:

- 80 ~ 100 °C Glasierung des EPS
- 90 ~ 120 °C das EPS kollabiert, Volumenabnahme bis 4000 %
- 150 ~ 250 °C die EPS–Perlen schmelzen zu viskoser Masse
- 280 ~ 500 °C Verdampfung → Styrolmonomere, Benzene, Ethylbenzene, Toluol
- 275 ~ 300 °C Verdampfungsbeginn
- 400 ~ 420 °C Zersetzungsspeak
- 460 ~ 500 °C Ende der Vergasung
- > 450 °C Zersetzung in Hydrocarbone, C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> und Ruß
- > 1000 °C Entstehung von grafitischem Kohlenstoff

## 2.2. Varianten des Vollformgießverfahrens /11/

Um qualitätsgerechte Gussstücke, weniger Emissionen und Prozesssicherheit zu schaffen, wurde nach weiteren Varianten für das Vollformgießen gesucht. Einige Verfahrensvarianten werden mit Begriffen wie Magnetform– /9, 11, 34/, Unterdruck–Vollformgießverfahren /10, 11/, sowie Replicast CS /11, 35, 36/, Polyform /4, 11, 37/ und Castyral /11, 38, 39/ bezeichnet.

Wie bereits erwähnt, stellte R. Hofmann 1968 /9/ das **Magnetformverfahren** vor. Dabei verwendet man magnetisierbaren, rieselfähigen Formstoff, der durch ein Magnetfeld verfestigt wird. Bei dem von Krzyzanowski /10/ entwickeltem **Unterdruck–Vollformgießverfahren** wird das Schaumstoffmodell mit Binder freiem, rieselfähigem Sand umhüllt und dieser durch einen im Formbehälter erzeugten Unterdruck verfestigt. Das Magnetfeld bzw. der angelegte Unterdruck werden während des Gießprozesses aufrecht erhalten.

Bei dem von der SCRATA (GB) entwickeltem **Replicast CS** (Ceramic Shell Process) wird die Modelltraube aus Schaumstoff mehrmals mit einem keramischen Schlicker umhüllt. Die so entstandene Schicht wird in einem Zwei–Stufen–Prozess gebrannt. Bei der ersten Stufe wird der Schaumstoff entfernt und in der zweiten die erhaltene Schale verfestigt. Die Schmelze wird in die hohle Formschale gegossen. Dieses Verfahren ist durch eine niedrige Produktivität und hohe Prozesskosten gekennzeichnet.

Beim **Polyform-Verfahren** wird eine speziell entwickelte Schlichte in mehreren Schichten, durch Tauchen oder Sprühen, auf die fertig gestellte Modelltraube ähnlich dem Lost-Foam-Verfahren aufgetragen. Die an der Luft getrocknete Modelltraube wird in ein fluidisiertes Sandbett getaucht, das von einem gasförmigen Medium auf 427 bis 593 °C erwärmt wurde. Der Schaumstoff wird unter dem Einfluss der Wärme innerhalb weniger Minuten zersetzt. Die Zersetzungsprodukte werden aufgefangen und umgewandelt. Anschließend wird die Schmelze in die saubere Hohlform gegossen.

Beim **Castyral-Prozess**, der für das Vollformgießen von Aluminiumlegierungen entwickelt wurde, wird die auf Grund der Zersetzungsmechanismen des Schaumstoffs mögliche erhöhte Porosität im Gefüge minimiert. Hierbei wird der Formbehälter nach dem Gießen mit einem Deckel Druck dicht verschlossen und mit einem Absolutdruck von 11 bar beaufschlagt. Dieser Druck wird während der Erstarrung konstant gehalten.

Zur Bedeutung des Vollformgießens heute ist festzustellen, dass das Verfahren eine Facette des Spektrums möglicher praktikabler Gießverfahren ist, das zwar die „alten“ Verfahren nicht völlig ablösen kann, aber stets bei der Entwicklung neuer Gussteile in Erwägung gezogen werden sollte. Wichtig dabei ist immer die Bewertung dessen Vor- und Nachteile im Vergleich zu alternativen Verfahren.

### 2.3. Vor- und Nachteile

Die **Vorteile** des Vollformgießens, die seine Anwendung für geometrisch komplizierte, Kernreiche Gussteile fördern, sind [11, 40–43/:

- beim Gussteildesign: Es ergeben sich neue Möglichkeiten und damit verbessert sich die Wettbewerbsfähigkeit der Gussverbraucher. Mehrere Baugruppen können in ein Gussteil integriert werden.
- bei der Umweltbelastung: Durch den Wegfall von Formstoff- und Kernformstoffbindern entstehen weniger Schadstoffe beim Gießen und Auspacken. Der Anteil Abprodukte ist gering, da der Formsand fast vollständig wieder verwendet wird (Formstoffkreislauf). Emissionen können durch Biofilter gereinigt werden.

- bei der Wirtschaftlichkeit: Der Werkzeugverschleiß ist gering. Durch die Einsparung von Prozessstufen (keine Formstoffaufbereitung, keine Kernfertigung, Problemlose Entfernung der Formstoffreste) wird der Investitionsaufwand geringer. Wegen einfacherer Prozessgestaltung ist der Platzbedarf geringer. Das Fertigteil ist nach der Bearbeitung preis günstiger als bei den anderen Urformverfahren.
- bei der Gussteilqualität: Es werden keine Modellaushebeschrägen benötigt. Durch endabmessungsnahes Gießen sind kleinere Bearbeitungszugaben möglich. Gusstoleranzen sind besser als beim Kokillen- oder Sandguss. Da es keinen Grat und keinen Versatz wegen geteilter Formen gibt, entfällt die dafür erforderliche Nacharbeit. Die Oberflächenrauigkeit ist besser als beim Sandguss in Ton gebundenen Formen.
- bei den Arbeitsbedingungen: Die Staub-, Lärm- und Hitzebelastungen am Arbeitsplatz werden verringert. Durch eine hohe Mechanisierbarkeit und Automatisierbarkeit werden eine hohe Arbeitsproduktivität und Prozessstabilität gewährleistet. Beim Gussputzen wird körperlich schwere Arbeit minimiert.

Die **Nachteile** des Vollformgießens sind /11, 16, 40, 42/:

- beim Gussteildesign: Die reproduzierbare Genauigkeit ist derzeit noch ungenügend untersucht. Wandstärken unter 2,5 mm sind schwer realisierbar. Ein ungünstiges Verhältnis von Länge zu Breite des Gussteiles bereitet Probleme.
- bei der Umweltbelastung: Bei der Schaumstoffzersetzung entstehen Kohlenwasserstoff-Verbindungen.
- bei der Wirtschaftlichkeit: Die Werkzeugkosten sind vergleichbar mit denen beim Kokillen- und Druckguss, aber höher als beim Sandguss. Werkzeugänderungen sind teuer.

Das Gussteil ist in der Regel teurer als bei anderen Form- und Gießverfahren.

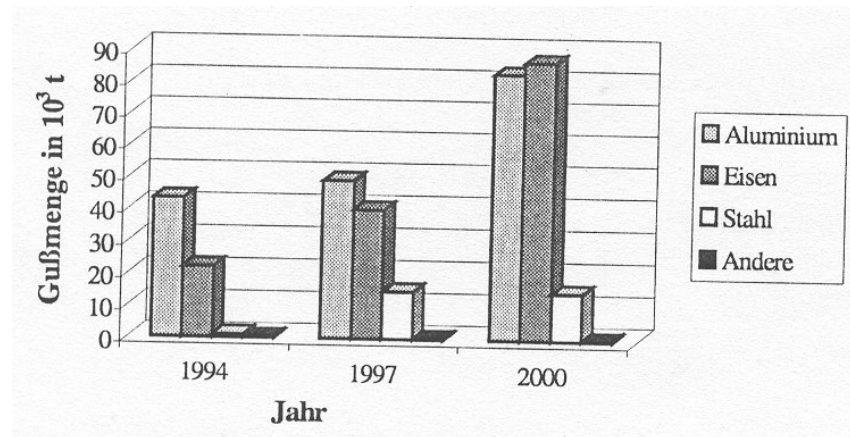
- bei verfahrensbedingten Gussfehlern: Wenn auf Grund der Schaumstoffzersetzung im Zersetzungsprodukt ein Kohlenstoffüberschuss entsteht, führt das beim Gusseisen zu Glanzkohlenstoffeinschlüssen und beim Stahlguss zur Aufkohlung. Bei den Nichteisenmetallen besteht eine Neigung zur Gasporosität. Bei falscher Vibrations-technik ist eine Deformation der Modelle möglich.

Das Gussteil selbst ist zwar teurer als bei anderen Verfahren, der wirtschaftliche Vorteil liegt aber in der Betrachtung des Fertigteilpreises. Durch die Einsparungen bei der Nacharbeit, Bearbeitung und Montage liegt der Fertigteilpreis sehr viel niedriger als bei den anderen Gießverfahren /11/.

## 2.4. Entwicklungstendenzen

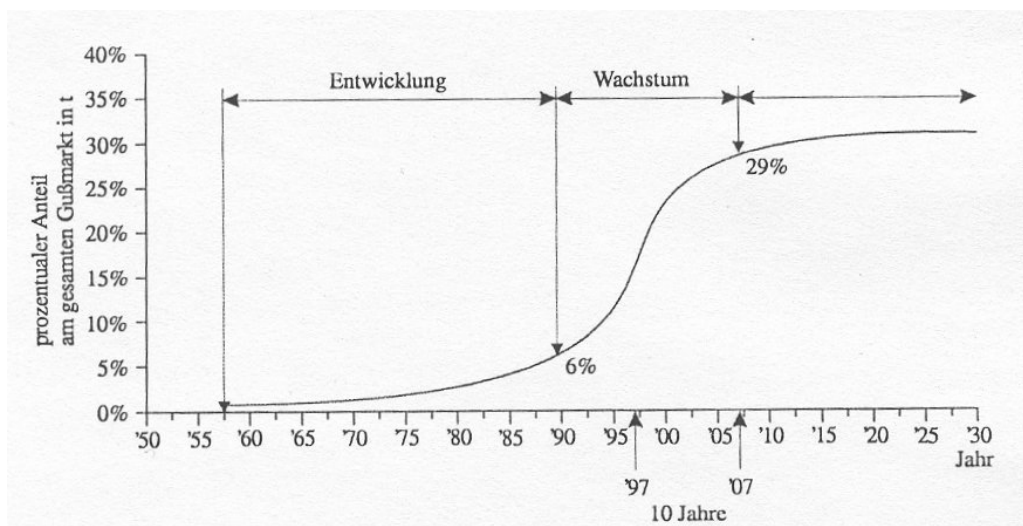
Auf Grund der hohen Gestaltungsfreiheit bei der Konstruktion kommt man beim Einsatz einer Lost-Foam-Fertigung auch der Forderung nach endabmessungsnahem Gießen sehr nahe. Eine erfolgreiche Einführung des Lost-Foam-Gießverfahrens erfordert jedoch das Zusammenspiel vieler Disziplinen im Sinne eines Simultaneous Engineerings. Da über die Hälfte der Prozessvarianten auf der „weißen Seite“, der Schäumtechnik, liegt, muss sich der Gießer mit diesem Gebiet befassen, auch wenn das Schäumen und Kleben der Modelle außerhalb der eigenen Firma geschehen kann. Für einen erfolgreichen Einsatz der Lost-Foam-Technik ist es außerdem unabdingbar, dass kontrolliert nach einem dokumentierten Standard gearbeitet wird /12/.

In der Welt weiten Anwendung des Vollformgießverfahrens ist der Trend eindeutig auf die Serienfertigung ausgerichtet und im internationalen Vergleich stehen hier die USA eindeutig an vorderster Stelle. Das wird einmal in den vergossenen Tonnagen und den Mengenanteilen deutlich. In **Bild 5** ist die in den USA nach dem Lost-Foam-Verfahren gegossene Tonnage der unterschiedlichen Werkstoffgruppen in der Entwicklung der letzten fünf Jahre dargestellt. Neben dem Einsatz von Aluminium hat vor allem auch die Produktion von Lost-Foam-Bauteilen aus Gusseisen sehr stark zugenommen. **Bild 6** zeigt den prozentualen Anteil der Lost-Foam-Gussstücke aus Aluminium am Gesamt-Aluminiummarkt. Es ist zu sehen, dass die



**Bild 5: Zunahme der nach dem Lost-Foam-Verfahren in den USA gegossenen Gussmengen /44/**

Produktion nach dem Lost-Foam-Gießverfahren zur Zeit stark ansteigt und im Jahr 2007 rund 30 % des gesamten US-Marktes ausmachen wird /12/.

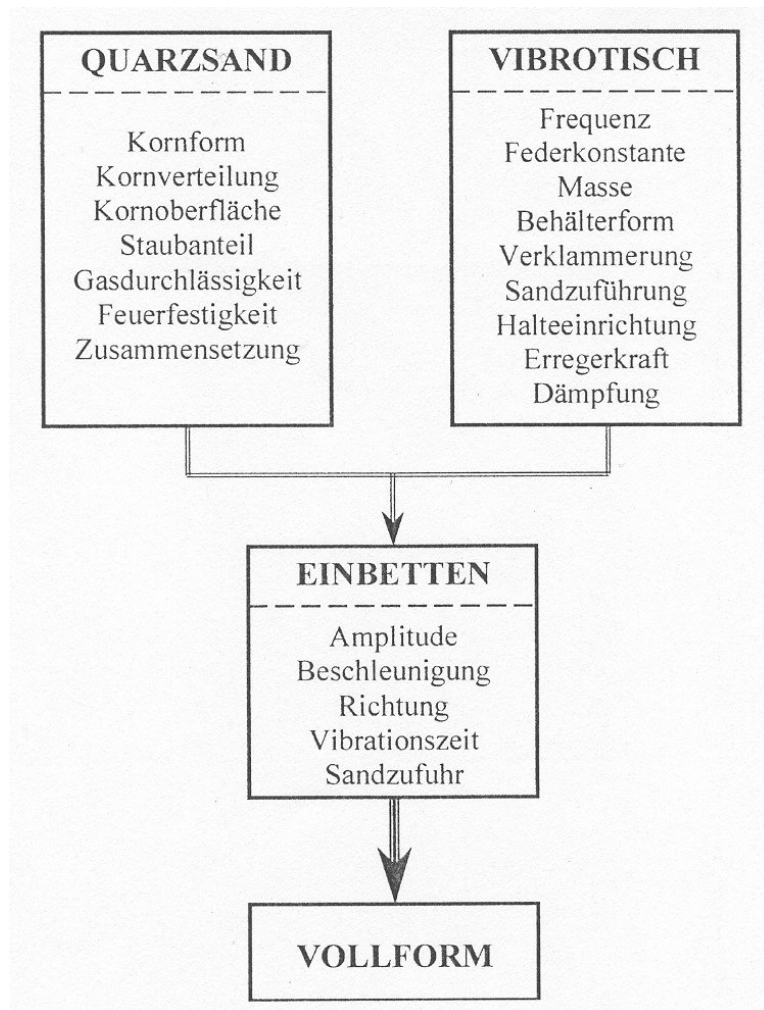


**Bild 6: Prozentualer Anteil der Lost-Foam-Gussteile am Gesamtgussmarkt für Aluminium in den USA /44/**

In Europa setzt sich dieser Trend Zeit verzögert durch, hier liegt der Schwerpunkt noch bei Einzelgussstücken und kleinen Serien. Das Wachstumspotenzial wird auf Grund der zunehmenden Leichtbauweise auch in Europa bei den Leichtmetallen (Aluminium) am größten eingeschätzt /3/.

## 2.5. Einflussparameter bei der Vollformherstellung

Die Formstoffherstellung für das Vollformgießverfahren ist, wie die meisten Gießerei technischen Verfahrensschritte, von den Komponenten *Stoff* (Quarzsand), *Maschine* (Vibrotisch) und deren beider Zusammenführung im unmittelbaren *Prozess* (Einbetten) gekennzeichnet (**Bild 7**), wobei im Ergebnis dieser Wechselwirkungen eine abgussbereite und qualitätsgerechte Form hergestellt werden soll.



**Bild 7:** Einflussparameter und Komponenten der Vollformherstellung /11/

### 2.5.1. Stoffparameter

Der zur Herstellung von Formen für das Vollformgießen verwendete Quarzsand sollte trocken und Binder frei sein. Außerdem muss er bestimmte Anforderungen hinsichtlich Kornform, Kornverteilung, Kornoberfläche, Staubanteil, Gasdurchlässigkeit, Feuerfestigkeit und chemischer Zusammensetzung erfüllen /45/.

Die dichteste Packung der Sandkörner lässt sich bei einer Kornverteilung erreichen, bei der neben großen Körnern auch ein entsprechender Feinkornanteil vorliegt, der die Poren des großen Körnerverbandes ausfüllt. Leider steht dieser für die Erzielung einer hohen Dichte positiven Erscheinung eine gleichlaufende Verringerung der Gasdurchlässigkeit gegenüber, die für das Abströmen der gasförmigen Modellzersetzungsprodukte unerlässlich ist. Es muss stets ein Kompromiss gefunden werden, der beiden Anforderungen gerecht wird. Als geeignet haben sich grobkörnige, runde Sande /46/ erwiesen, die auch ein gutes Fließvermögen aufweisen. Dabei ist es notwendig, den umlaufenden Sand zu entstauben, um entstandene, überschüssige Feinanteile zu entfernen. Feuerfestigkeit und chemische Zusammensetzung sind in Übereinstimmung mit dem zu vergießenden Metall auszuwählen.

### **2.5.2. Maschinenparameter**

Zur Formherstellung für das Vollformgießverfahren sind folgende Parameter des Vibrotisches wichtig: Frequenz, Federkonstante, Masse, Behälterform, Verklammerung, Sandbunkerauslass, Halteeinrichtung, Erregerkraft und Dämpfung.

Durch eine Kombination der Drehzahl, der Unwuchtmassen und ihrer Winkelverschiebung sowie Wellendrehrichtung können (bei einer Unwuchterregung) die für das Einbetten erforderlichen Prozessparameter realisiert werden. Eine Behälterverklammerung schafft die Voraussetzungen, dass der Behälter fest mit der Grundplatte verbunden ist und so die Schwingungen des Vibrationsantriebes über den Behälter in den Sand gelangen. Damit die Grundplatte und der darauf befindliche Behälter überhaupt in Schwingungen versetzt werden können, muss die Grundplatte auf elastischen Federelementen abgestützt werden.

Wenn bei eindimensionaler, vertikaler Einleitung der Erregung auf eine Verklammerung verzichtet wird, dann müssen die damit verbundenen Nachteile in Kauf genommen werden. D. h., die Grundplatte und der Behälter schwingen nicht synchron und bei Beschleunigungen über 1 g ist mit dem Abheben des Behälters vom Tisch zu rechnen.

Um den Sandbedarf, den Energieaufwand bei der Verdichtung, das Auftreten von Sandströmen sowie die Umhüll- und Verdichtungszeiten zu minimieren, sollte der Behälter so klein wie möglich sein. Aus der Sicht des Ausbringens bzw. der Wirtschaftlichkeit, die möglichst viele Teile pro Gießbehälter als Zielgröße hat, sollte der Behälter möglichst groß sein. In den Gießereien werden üblicher Weise Behälter eingesetzt, die mit einer Füllhöhe von ca. 1,0 m



und einem Durchmesser von ca. 0,8 m, das entspricht einer Sandmenge von ca. 0,75 t, beiden Ansprüchen gerecht werden.

Die Sandzufuhr aus dem Vorratsbunker in den Formbehälter soll zügig und gleichmäßig vorgenommen werden. Die Fallhöhe des Sandes ist auf einen minimal möglichen Wert zu beschränken, um das Abreiben der Schlichte von der Modelloberfläche zu vermeiden. Der Sand kann mit Hilfe von flexiblen Rohren, über Rutschen oder nach dem „Regenfallprinzip“ aus mehreren Bunkerauslauföffnungen in den Behälter einfließen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Quarzsand das Modell gleichmäßig von allen Seiten umschließt. Bei nur einseitiger Sandzufuhr besteht die Gefahr des Kippens und Verziegens des Modells /47/.

Das Fixieren des Modells ist von großer Wichtigkeit, da durch die während des Einformens auftretenden Sandströmungen eine Bewegung des Modells nicht auszuschließen ist.

### **2.5.3. Prozessparameter**

Die richtige Einstellung der Vibrationsparameter ist von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Gießform und damit für den Erfolg des gesamten Herstellungsprozesses /26, 41, 45, 46, 48–51/. Bei der Formherstellung sind folgende Vibrationsparameter wichtig:

- Vibrationsrichtung und Zahl der Schwingungsachsen
- Frequenz
- Amplitude
- Dauer der Vibration.

#### **– *Vibrationsrichtung***

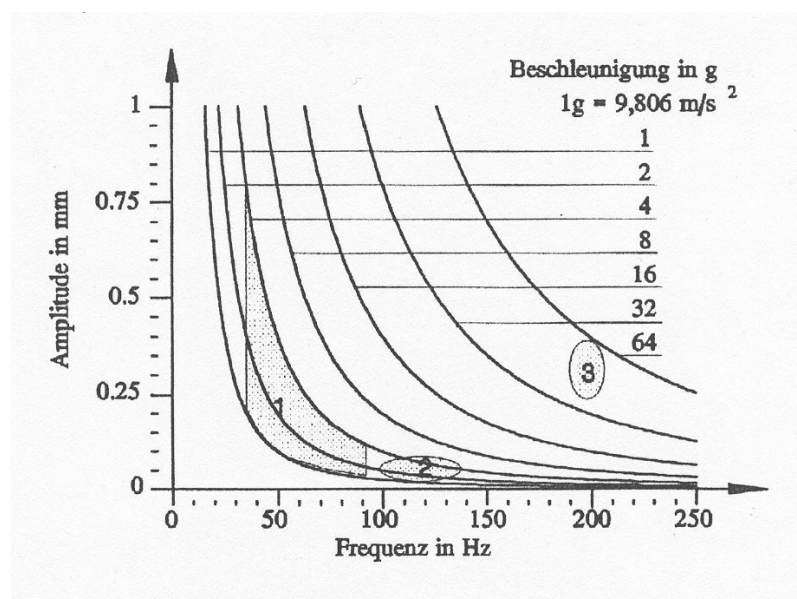
Prinzipiell sind insgesamt sechs Schwingungsarten möglich – drei lineare Achsen und drei Drehschwingungsachsen. Handelsübliche Vibrationstische schwingen oft gleichzeitig in allen sechs Achsen in einer komplizierten Mischung von Vibrationsbewegungen, die nicht immer reproduzierbar sind. Oftmals generieren solche Systeme ungleichmäßige Schwingungen in mehrere Richtungen auch dann, wenn die Schwingungen in nur einer Richtung eingebracht werden /49/.

### – Vibrationsdauer

Es besteht die einheitliche Meinung, dass 90 % der Sandverdichtung in den ersten 30 s stattfinden, so dass eine Ausdehnung der Vibrationszeit darüber hinaus nicht sinnvoll ist /52/. Die Wahl der Vibrationsdauer wird in erster Linie vom Ausfüllen der Hohlräume und Hinterschneidungen des Modells bestimmt. Dieser Vorgang läuft langsamer als die eigentliche Verdichtung ab und beeinträchtigt bei längeren Verdichtungszeiten die Produktivität der gesamten Formlinie.

### – Amplituden und Frequenzen

Nach der Schwingungstheorie hängen Frequenz, Beschleunigung und Amplitude zusammen. Die in der Praxis üblichen Werte für Amplituden und Frequenzen lassen sich laut Literaturangaben /46, 53, 54/ in drei Bereiche einordnen (**Bild 8**).



**Bild 8:** In der Praxis übliche Amplituden und Frequenzen der Vibrationsverdichtung /52/

Im eingeschwungenen Zustand bestimmen Amplitude und Frequenz die bei der Vibration auftretende Beschleunigung nach folgender Gesetzmäßigkeit:

$$b_{\max} = a_{\max} * (2 * \pi * f)^2 \quad (1)$$

$b_{\max}$  – maximaler Wert der Vibrationsbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$a_{\max}$  – maximaler Wert der Amplitude [m]

$f$  – Vibrationsfrequenz [Hz]

Die niederfrequenten Vibrationsverdichtungen arbeiten mit Frequenzen von 30 bis 70 Hz bei Beschleunigungen zwischen 1 g und 4 g (Bereich 1) /46, 53–55/. Andere Veröffentlichungen /41, 48, 56, 57/ enthalten nur Angaben zur Frequenz, die zwischen 30 und 100 Hz liegen sollte. Als Ergebnis einer umfangreichen amerikanischen Untersuchung werden Frequenzen zwischen 100 und 125 Hz bei Beschleunigungen zwischen 2 g und 4 g empfohlen (Bereich 2) /49/.

In der Veröffentlichung /55/ werden Vibrationsbeschleunigungen zwischen 1 g und 3 g empfohlen. Wichtigste Voraussetzung für eine ausreichende Verdichtung und Modellhinterfüllung ist, dass der Sand nur teilweise in den obersten Schichten in Bewegung versetzt wird, während die unteren Schichten keine Verschiebung der Körner zueinander aufweisen sollten. Dadurch werden die Sandströmungen im Behälter und damit die Gefahr eines Modellverzugs wesentlich reduziert /55/.

Bei einer Vibrationsbeschleunigung bis 0,8 g ist die erreichte Sanddichte unzureichend und bei Beschleunigungen über 2 g werden die Modelle oft verformt. Übliche Parameter sind Vibrationsbeschleunigungen zwischen 0,9 und 1,0 g bei Frequenzen zwischen 50 und 60 Hz. Der Verdichtungsgrad des Sandes erhöht sich mit steigender Frequenz /58/. Um den Sand zu verdichten, braucht man nach /47/ eine Vibrationsbeschleunigung über 1,2 g. Über 5 g tritt zunehmend eine Auflockerung des Sandes auf.

Die Parameter des Bereiches 3 sind für die Anwendung in der Praxis nicht relevant, da solche Vibrationsbeschleunigungen von 40 g und mehr sehr hohe Erregerkräfte erfordern, um die relativ große Behältermasse (ca. 1,4 t) derart zu beschleunigen /59/. Der dazu erforderliche Maschinen technische Aufwand ist unter betrieblichen Bedingungen einfach nicht realisierbar.

Über einen Omni–Axis–Vibrationstisch, der mit einer Frequenz von 500 Hz arbeitet, berichtet Creed, P. S. /46/. Diese unwahrscheinlich hohe Frequenz von 500 Hz kann auch sehr schwer mit der herkömmlichen Vibrationstechnik realisiert werden.

Von /11/ wurden zwei Beschleunigungsbereiche mit unterschiedlichem Verhalten des Sandes unter Vibrationseinwirkung ermittelt:

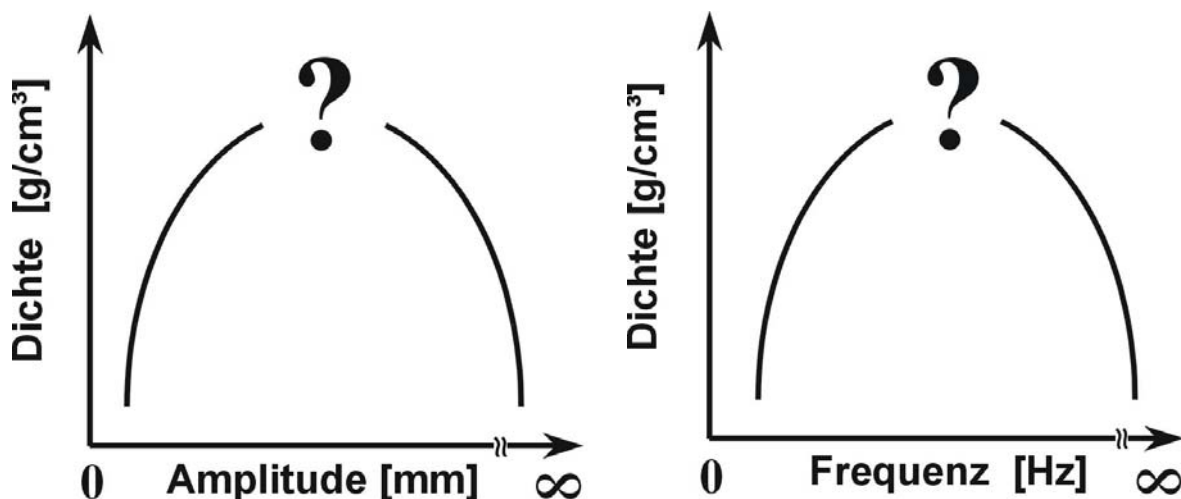
1. Bei Beschleunigungen kleiner 1 g befindet sich der Sand im Zustand der Pseudoverflüssigung und bewegt sich gemeinsam mit dem Behälter. Dabei werden die innere Reibung

und Anzahl der Lücken zwischen den Sandkörnern verringert, und der Sand wird deshalb dichter.

2. Bei Beschleunigungen größer 1 g bewegt sich der Sand sehr intensiv und hebt kurzzeitig vom Behälterboden ab. Er befindet sich im Zustand des Vibrokochens.

Eine maximale Sandverdichtung im Bereich der Pseudoverflüssigung wird bei Amplitudenbeschleunigungen erreicht, die knapp unterhalb der Erdbeschleunigung liegen /11/. Um den Transport des Formsandes in die Hohlräume und Hinterschneidungen der Modelle zu gewährleisten, sollte sich der Sand im Zustand des Vibrokochens befinden /11/. Mittels mathematischer Modelle werden die Dichteverteilung des Sandes im Formbehälter und das Auftreten von Auflockerungserscheinungen während der Vibration erklärt, die an Hand experimenteller Untersuchungen nachgewiesen wurden. Eine maximale Sandverdichtung wurde bei einem b/g-Verhältnis von 1,4 erreicht. /11/

Die Sandsäule bzw. Sandschichthöhe beeinflusst die Transport- und Verdichtungsprozesse des Sandes, da mit zunehmender Sandsäule die Beweglichkeit und die erzielbare Dichte abnehmen /11/. Bei den Prozessparametern wurde u. a. die gewählte Vibrationsrichtung als wesentlicher Einfluss auf die Sandverdichtung herausgearbeitet, da bei der horizontalen Vibration höhere Sanddichten erzielt wurden als bei der vertikalen Vibration /11/. Die Beweglichkeit des Sandes ist bei zweidimensionaler Vibration besser.



**Bild 9: Fragestellung nach einer maximal effektiven Amplitude und Frequenz**

Dabei ist die Frage nach dem dominierenden Einfluss entweder der Frequenz oder der Amplitude auf die Sandverdichtung nicht geklärt (**Bild 9**).

## – *Messung der Vibrationsparameter*

Zur Klärung der Vorgänge, die im Sand während der Verdichtung ablaufen, benötigt man direkte Informationen über den zeitlichen Verlauf der Vibrationsparameter (Amplitude, Geschwindigkeit und Beschleunigung) sowohl des Formbehälters als auch des Sandes. Die ersten Messeinrichtungen wurden von italienischen Forschern /38/ beschrieben. In dieser Veröffentlichung wird eine Untersuchung der erzeugten Schwingungen durch Messungen mit Beschleunigungsaufnehmern an unterschiedlichen Positionen im Formkasten und im Sand vorgestellt. Die Versuchseinrichtung erzeugt die Vibration mittels gegeneinander rotierender Unwuchten, die unterschiedlich in Abhängigkeit von der Modellgeometrie synchronisiert werden. Der Formbehälter ist mit dem Vibrationstisch durch eine hydraulische Ankopplung verbunden. Durch die Messungen an unterschiedlichen Stellen des Formkastens und des Sandes in verschiedenen Richtungen und Integration der erhaltenen Messwerte wird eine räumliche Darstellung der auftretenden Schwingungen erstellt /38/.

Es existiert ein ausgeprägter Zusammenhang zwischen den Vibrationsparametern des Formkastens und des Sandes, aber die in den Sand übertragenen Schwingungen sind nicht mit den Behälterschwingungen vollkommen identisch /38/. Deshalb müssen die Vibrationsparameter auch direkt im Sand gemessen werden.

## 2.6. Aktuelle Entwicklungstendenzen

### 2.6.1. Vibrationstisch



**Bild 10: VULCAN-VECTOR-FLO® Füll- und Verdichtungsanlage /60/**

Wenn im Rahmen des Lost-Foam-Verfahrens der Einfüll- und Verdichtungsprozess bezüglich seines erreichten Standes der Technik betrachtet wird, ist der Welt weit führende Anbieter von kompletten Vibrationsanlagen, die Vulcan Engineering Co. meist Richtungweisend. Die vom Unternehmen offerierte neueste Entwicklung besteht in einer **VECTOR-FLO® Verdichtungsanlage** /60/ (**Bild 10**).

Die vorgestellte Verdichtungssystemtechnik

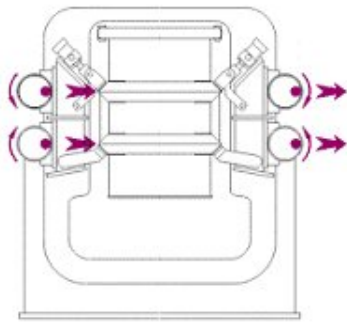
besteht in vier getrennt voneinander arbeitenden Schwingungserzeugern (Unwuchtvibratoren), die eine unabhängige Drehzahlregelung und Variation während des „laufenden Betriebes“ gestatten. Durch die Kombinationsmöglichkeiten, die sich aus der Phasenregelung der Unwuchtmotoren ergeben, lassen sich unterschiedlichste Schwingungen erzeugen. /60/

Die Vorteile des neuen Verdichtungssystems bestehen darin, dass sich die Frequenzen, Amplituden und Vibrationsrichtung(en) alle nach Wunsch einstellen lassen. Vorgesehene Veränderungen der Vibrationsparameter sind, ohne den Vibrationszyklus zu unterbrechen, möglich, die dabei auftretende Nachlaufzeit ist  $< 0,3 \text{ s}$ . Diese schnelle „Wechselfähigkeit“ unterdrückt auch das sonst übliche verlängerte „Runterlaufen“. Die Anlagenmasse ist symmetrisch um die Behältermittelachse angeordnet, damit wird eine ebenfalls symmetrische Einleitung der Prozessparameter in den Behälter ermöglicht. Mit diesem System kann der Sand in mehrere Richtungen zum Fließen gebracht werden, um bevorzugt Modellhohlräume zu füllen. /60/

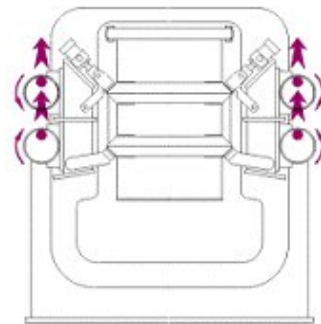
Die Behälterverklammerung erfolgt unter „Druck“-Anwendung, dabei wird der Behälter auf das Gerüst gespannt und so eine versteifte dynamische Anordnung erzeugt. Eine automatische Niveauregulierung hält den Behälter konstant auf Höhe und trennt die Schwingungsenergie von der Basis. Durch die Verwendung von Gießerei typischen Vibratoren werden die Aufwendungen für die Instandhaltung minimiert und die Systemverwendungsfähigkeit erhöht. Das verwendete 4-Motor-System erzeugt weniger Lärm als mechanisch geregelte Systeme und gestattet höhere Drehzahlen, ohne die sonst üblichen aufwendigen und empfindlichen Ölschmierkreisläufe verwenden zu müssen. /60/

Mit dem neuen Vulcan **VECTOR-FLO<sup>®</sup> System** wirken alle Techniken gleichartig zusammen. Die Prozessfähigkeit und Reproduzierbarkeit des Lost-Foam-Verfahrens wird verbessert, und das gefällige Design begünstigt die betriebswirtschaftlichen Synergieeffekte. /60/

Auf Grund der vom Hersteller dermaßen gepriesenen Vorzüge seiner neu entwickelten Füll- und Verdichtungseinheit drängt sich die Vorstellung auf, dass mit diesem Vibrationstisch alle nur denkbaren Vibrationen auch bezüglich der Richtung(en) frei wählbar sind. Bei der Betrachtung der von Vulcan Engineering dargestellten prinzipiellen Wirkungsweise wird jedoch deutlich, dass neben horizontalen Bewegungen (**Bild 11**) und vertikalen Vibrationen (**Bild 12**) auch die Kombination beider (u. a. Pendelschwingungen /60/) möglich sind, die aber ausschließlich innerhalb der dargestellten Ebene stattfinden. Eine Vibrationserregung in der Richtung senkrecht zu dieser Ebene, d. h., in Bewegungsrichtung des Behälters beim Weitertransport nach dem Füll- und Verdichtungstakt ist schon auf Grund der Anordnung der Un-



**Bild 11: horizontale Bewegung /60/**



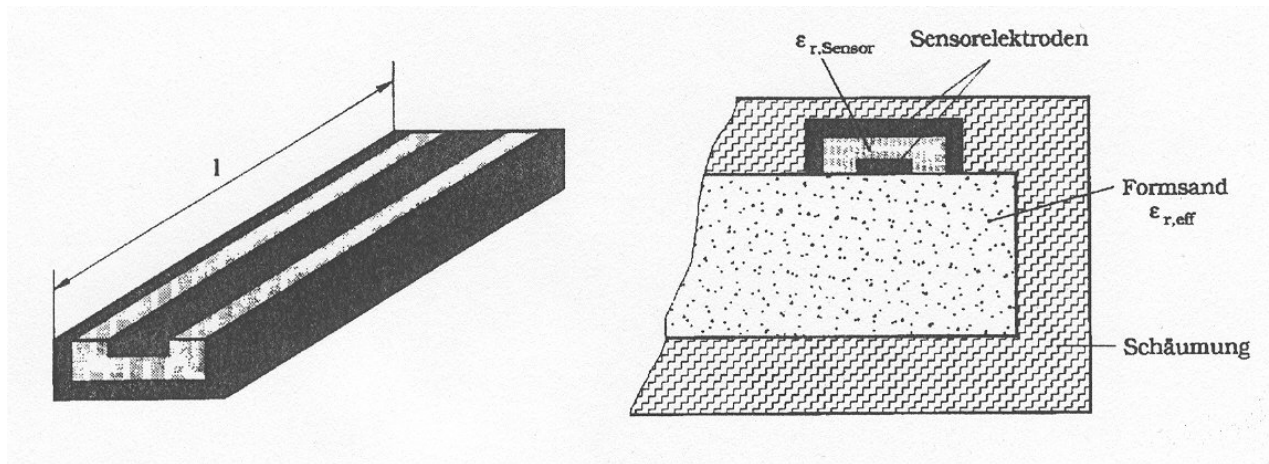
**Bild 12: vertikale Bewegung /60/**

Wuchtvibratoren technisch nicht möglich. Mit der Variation der Motorphasen einen raschen und unproblematischen Wechsel zwischen den möglichen Vibrationsrichtungen: horizontal, vertikal und Pendelschwingung Programm gesteuert durchführen zu können, ist ein großes Plus dieser Füll- und Verdichtungseinheit, wie es von einem Anwender bestätigt wird. Jedoch vibriert der Tisch bei gleichzeitiger horizontaler und vertikaler Erregung mit einer Frequenz, während die Amplituden von **0** bis **100 %** variiert werden können, wobei die Summe **100 %** nicht überschritten werden kann. Mit diesen Einschränkungen ist das Erzeugnis nur als ein 2-D-Tisch der unteren Kategorie bewertbar. Für die Anwender auf Grund der möglichen Steuerungs- und Programmierungsvarianten und weiterer Vorzüge im Handling ist dieser Tisch als durchaus komfortabel zu bezeichnen, aber aus wissenschaftlicher Sicht, bezogen auf die Möglichkeiten mehrachsige Zusammenhänge des Befüllungs- und Verdichtungsprozesses zu untersuchen, ein Schritt zurück.

#### **2.6.2. Sensoren zur Untersuchung der Verdichtungseigenschaften – Messprinzip /11/**

Um die Transportvorgänge und Verdichtbarkeit des Sandes zu bewerten, wurden an der TU Bergakademie Freiberg Messsensoren entwickelt, die auf der kapazitiven Messung eines sich verändernden Dielektrikums zwischen zwei Kondensatorplatten beruhen.

Der Aufbau des Sensors ist im **Bild 13** dargestellt. Die Elektrodenflächen sind dabei so gestaltet, dass eine Elektrode gleichzeitig als Schirmung gegen alle nicht vom Sand hervorgerufenen Einflüsse wirkt. Die Länge des Sensors kann an das jeweilige Messvolumen angepasst werden. Die konstruktive Gestaltung der Elektrodengeometrie macht es möglich, den Sensor an den erforderlichen Stellen direkt in die Schäumung einzubauen. Damit wird eine Messung selbst in kleinsten Räumen ohne störende Rückwirkungen durch das Messsystem möglich.



**Bild 13: Sensorgestaltung und -einbau im Modell /11/**

Die Kapazität des Elektrodenpaares wird von der Geometrie und damit vom elektrischen Feldbild sowie von den relativen Dielektrizitätskonstanten der Isolation im Sensor  $\epsilon_{r,\text{Sensor}}$  und des Formsandes  $\epsilon_{r,\text{Sand}}$  beeinflusst (**Bild 13**). Für den Messeffekt wiederum ist maßgebend, dass die effektiv wirksame Dielektrizitätskonstante des Formsandes  $\epsilon_{r,\text{eff}}$  vom Füllungsgrad und von der Sanddichte abhängt. Die Formelmäßige Zusammenstellung ist in der Gleichung (2) dargestellt:

$$C = A \cdot \epsilon / d \quad (2)$$

C – Kapazität [pF]

A – Fläche [m<sup>2</sup>]

d – Abstand [m]

$\epsilon$  – Dielektrizitätskonstante [pF/m]

## 2.7. Analyse der Literaturlauswertung – Problemstellung

Der Einfüll- und Verdichtungsprozess als wichtiger, die Qualität beeinflussender Teil des Vollformgießverfahrens hat bekannter Maßen eine allseitige Umhüllung des abzugießenden Bauteiles mit dem Binder losen Sand und dessen Verdichtung zum Ziel. Je komplizierter nun die Bauteilgestaltung insbesondere bezüglich der zu befüllenden Hohlräume und Hinterschnidungen wird, desto schwieriger und Zeit aufwändiger wird es, diese Zielstellung auch in jedem Falle zu erreichen. Die daraus resultierenden langen Vibrationszeiten wirken sich nachteilig auf die Effektivität des ganzen Produktionsprozesses aus und führen oftmals zu einer Beschädigung des abzugießenden Modells.



Eine Intensivierung der Vibration, um die Vibrationszeiten zu senken und damit die Effektivität zu erhöhen, führt anstatt zur Sandverdichtung zu einer Auflockerung des Sandes. Aufgelockerte Stellen in der Form sind Ursache für Gussfehler, wie starke Penetration oder Auswüchse am Gussteil.

Während der Vibration des Formstoffbehälters bilden sich meist mehr oder weniger stark ausgeprägte Sandströmungen aus, die dann oft zu einem Modellverzug oder gar zur Modellzerstörung und damit zum Ausschuss des Gussstücks führen können. Diese Strömungen können des weiteren auch die Schlichteschicht des Modells beschädigen und somit die Penetrationsgefahr erhöhen. Es existieren keine verlässliche Hinweise darauf, wie die Sandströmungen zu minimieren sind.

In der Literatur gibt es relativ wenige vollständige Angaben über die optimalen Vibrationsparameter. Sie werden empirisch ermittelt und individuell jedem Gussteil angepasst /51/. Es fehlt eine theoretische Erklärung für nachteilige Erscheinungen wie z. B. Sandströmungen im Formbehälter oder Auflockerung des Sandes während der Vibration.

Zur optimalen Vibrationsrichtung existieren widersprüchliche Meinungen. Angewendet werden Vibrationstische, die vertikal, horizontal oder gleichzeitig in mehreren Achsen vibrieren. Dabei zeigt sich, dass mit den unterschiedlichen Vibrationstischen qualitätsgerechte Gussteile produziert werden, so dass scheinbar keine eindeutig bevorzugte Vibrationsrichtung definiert werden kann /46, 47, 50/. Eine zweidimensionale Vibration bewirkt eine höhere Verdichtung des Sandes als eine eindimensionale Vibration und wird deshalb oftmals, wenn möglich, bevorzugt /58/.

Allgemein bewirkt die Vibration eine Sandverdichtung um etwa 10 bis 20 % /47, 48/. Dabei fällt mit dem Starten der Vibration der Sand in sich zusammen, und es entsteht eine ausgeprägt schnelle Abwärtsbewegung, in deren Folge sich eine Modelldeformation einstellen kann. Deshalb wäre es sinnvoller, den Sand Schicht weise einzufüllen und jede Schicht zu vibrieren. Um aber damit die Einformzeit nicht über Gebühr auszudehnen, ist es besser, bei kontinuierlichem Füllen zu vibrieren, wie es von einigen Anwendern bereits praktiziert wird /47/.

Die Vorteile des Vollformgießverfahrens gegenüber den konventionellen Gießverfahren können nur dann ausgenutzt werden, wenn eine stabile Qualität der Serienproduktion in ausreichend hohem Maße gewährleistet ist. Die hohe Flexibilität des Verfahrens sollte nicht

durch lange und teure Vorversuche für die empirische Ermittlung der optimalen Prozessparameter bei einem Sortimentswechsel beeinträchtigt werden.

Auf der Suche nach einem möglichst sicherem Weg, die Hohlräume und Hinterschneidungen der abzugießenden Bauteile in einer ausreichend guten Qualität mit Formsand zu befüllen, stellen sich im überwiegenden Falle die Gießereien die Frage, mit welcher Vibrationsrichtung, horizontal **oder** vertikal, und mit welchem Vibrationsregime lässt sich das Ziel erreichen? Weniger wird sich mit der Variante, horizontal **und** vertikal zu vibrieren, befassen, geschweige denn mit einer dreiaxialen Vibration. Dass die Schwerkraft überwunden werden muss, um den Sand in Bewegung versetzen zu können, ist eine allseits anerkannte Tatsache, aus der dann oft geschlussfolgert wird, dass mit einer vertikalen Vibration den Anforderungen am besten entsprochen wird. Andere mögliche Einflussgrößen, außer der zu überwindenden **Schwerkraft**, finden keine nennenswerte Beachtung. Deshalb ist es wichtig, die Möglichkeiten und auch die Grenzen einer eindimensionalen, vertikalen Vibration noch einmal einer näheren Betrachtung zu unterziehen. In diesem Zusammenhang wäre auch auf die Frage der Behälterbefestigung, notwendig oder überflüssig(?), einzugehen. Denn oftmals wird in den Gießereien aus Gründen des technologischen Ablaufes darauf verzichtet, den Formstoffbehälter fest mit dem Vibrationstisch zu verbinden, d. h., zu verklammern. Oder ist der zusätzliche Aufwand einer **Verklammerung** auf Grund der wirkenden Erregerkräfte unverzichtbar, um die Möglichkeiten der Vibrationsanlage besser ausnützen zu können?

Mit dem Start der Vibration wird die Masse des gefüllten Behälters von „0“ auf die gewählte Frequenz(en) und Amplitude(n) beschleunigt, was zu einer kurzfristigen Mehrbelastung einzuformender Modelle führt, die in Verbindung mit der raschen Abwärtsbewegung des Sandes noch verstärkt wird. Daraus ergibt sich die Frage, ob man diesen **Einschwingvorgang** in seinem Ablauf anders gestalten kann, indem z. B. der Behälter aus dem Ruhezustand an den bereits eingeschwungenen Vibrationstisch andockt wird, und dessen negativen Auswirkungen auf die Modelle reduzieren kann.

Für die systematische Untersuchung der räumlichen Bewegung des Sandes, seines Strömens im Formstoffbehälter und einer möglichen Ausnutzung dieser Sandströmungen für das Befüllen der Hohlräume und Hinterschneidungen, ohne deren beschriebenen negativen Wirkungen in Kauf nehmen zu müssen, ist auch eine komplexe, dreidimensionale Behältererregung erforderlich. Und indem der Behälter in den drei Achsen des Raumes mit voneinander unabhängigen, variierenden Frequenzen und Amplituden erregt wird, kann auch die Frage der **optimalen**

*Vibrationsrichtung* beantwortet werden. Oder gibt es diese am Ende gar nicht? Eine weitere Frage wäre, wie es sich mit dem auf der *Einformhöhe* beruhenden Schwerkrafteinfluss verhält, wird er durch die 3–D–Erregung in den Hintergrund gedrängt oder kann sich die Schwerkraft behaupten?

Für die Durchführung der Versuche mit dem 3–D–Tisch und den damit verbundenen Messungen ergibt sich die Frage, welchen Einfluss die Lage des Masseschwerpunktes auf das Schwingungsverhalten und damit auch auf die Füllung der Hohlräume und Hinterschneidungen und erzielbaren Dichtewerte besitzt. Tritt bei der Vibration eine *Verschiebung des Schwerpunktes* ein? Welchen Folgen hat diese und könnte sie vermieden werden?

Die Messung der Dichte unter Nutzung des im vorher gehenden Gliederungspunktes beschriebenen Sensors erfolgte auf der Basis einer Kompensationsschaltung /11/. Die Kompensationsmessung ist ja eigentlich die genaueste indirekte Messmethode, die es gibt, aber auf Grund der äußerst niedrigen zu messenden Kapazitäten (im pF–Bereich) sind moderne Kompensationsmessgeräte zu ungenau, so dass auf „Altgeräte“ zurückgegriffen werden musste. Obwohl mit diesen Messbrücken sehr genau gemessen wurde, hatten sie, wie alle „Röhrengeräte“, die bekannten Probleme mit dem „Warmlaufen“, dem Erreichen der Betriebstemperatur, die für den ordnungsgemäßen Ablauf der Messung erforderlich ist. Auf Grund der verwendeten Messbrücke besaß zudem das Messkabel nur eine einfache Abschirmung, die nicht alle äußeren Einflüsse kompensieren konnte. Da außerdem das „Warmlaufproblem“ im Verlaufe der Zeit zunahm, stellte sich die Frage, ob nicht vielleicht doch besser zur direkten Kapazitätsmessung übergegangen werden müsste?

### **3. Eingesetzte Messtechnik**

#### **3.1. Dichtemessungen**

Für die Messung der Formstoffverdichtung wurden die an der TU Bergakademie Freiberg entwickelten und unter **Pkt. 2.6.2. Sensoren zur Untersuchung der Verdichtungseigenschaften – Messprinzip** beschriebenen Sensoren verwendet. Als Messgeräte kamen (bis zu) zwei LCR–Messgeräte Typ HIOKI 3522 zum Einsatz, mit denen die geringen Kapazitätsänderungen im pF–Bereich auf direktem Wege gemessen werden können. Die so gewonnenen Daten wurden mittels Rechner messtechnisch erfasst.

Das LCR-Messgerät ist ein so genanntes „Universalmeßgerät“, dessen Meßsignalpegel von  $10\text{ mV}_{\text{eff}}$  bis  $5\text{ V}_{\text{eff}}$  (Konstantspannung) und von  $10\text{ }\mu\text{A}_{\text{eff}}$  bis  $100\text{ mA}_{\text{eff}}$  (Konstantstrom) variiert werden kann. Für die Kapazitätsmessung wurde ein Meßsignalpegel von  $5\text{ V}_{\text{eff}}$  und  $50\text{ mA}_{\text{eff}}$  eingestellt. Das Gerät besitzt einen vierpoligen Meßanschluss, d. h., die Signalübertragung vom Sensor erfolgt über vier getrennt geschirmte Kabel, damit kann der Einfluss des Kabels (Eigenkapazität) auf das Messergebnis eliminiert werden. Die Anpassung der Sensoren erfolgt derart, dass für jeden zu benutzenden Sensor am Messgerät der optimale Messbereich und die entsprechende -frequenz ermittelt wird. Wenn sich die äußeren Bedingungen, wie Formstoffzusammensetzung oder -feuchte, verändern, kann eine Nachregelung erforderlich werden.

Die Gerätebedienung erfolgt ausschließlich über einen Touch-Screen, dessen Bedienkomfort es u. a. auch ermöglicht, den gemessenen, auf dem Display angezeigten Wert in einer vergrößerten Messwertanzeige darzustellen. Das Gerät besitzt eine RS-232-Schnittstelle, vermittels derer der Messvorgang mit einem PC angesteuert und die Abspeicherung der gewonnenen Daten in einer Datei realisiert werden kann. Unter Zuhilfenahme einer spezifizierten Software DASYLab können während der Messung neben der Datenspeicherung die aufgenommenen Werte in Echtzeit auf dem PC-Monitor in einer Grafik angezeigt werden.

Um die gemessenen Werte gleich als Dichte am Monitor anzeigen bzw. in der ASCII-Datei abspeichern zu können, wurden die gemessenen Kapazitätswerte online in Dichteeinheiten umgerechnet. Für Nutzung dieser Umrechnung war es natürlich erforderlich, vorher die verwendeten Sensoren dem entsprechend zu kalibrieren. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang auch, dass mit jeder Kapazitätsmessung die Kapazität der Umgebungsluft mit gemessen wird und dieser Sachverhalt in die Gesamtbetrachtung mit einzubeziehen ist.

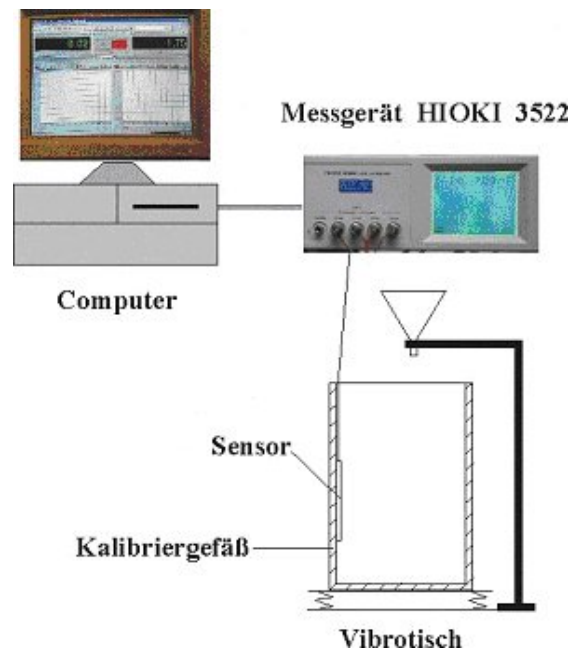
### **3.1.1. Kalibrierung der Sensoren**

Der Versuchsaufbau für die Sensorkalibrierung entspricht der schematischen Darstellung im **Bild 14**. Dazu wurde auf einer Siebmaschine ein Kalibriergefäß so befestigt, dass es ungehindert befüllt werden konnte. Die Befestigung des Sensors erfolgte in der Art, dass stets eine ausreichende Bedeckung während der Versuche gewährleistet war. Ein Trichter sicherte eine gleich bleibende Fließgeschwindigkeit des Sandes beim Befüllen. Die während des Messvorganges vom Sensor über das Messgerät ermittelten Kapazitäten wurden über die RS-232-Schnittstelle dem Anzeige- und Auswertesystem des Rechners zugeführt.

Diese Kapazitätswerte wurden dann den aus den Volumina und dazugehörigen Massen errechneten Dichtewerten gegenübergestellt. Das benutzte Kalibriergefäß hatte einen Durchmesser von 50 mm und eine Höhe von 100 mm. Von dem daraus errechneten Volumen wurde das jeweilige Sensorvolumen abgezogen.

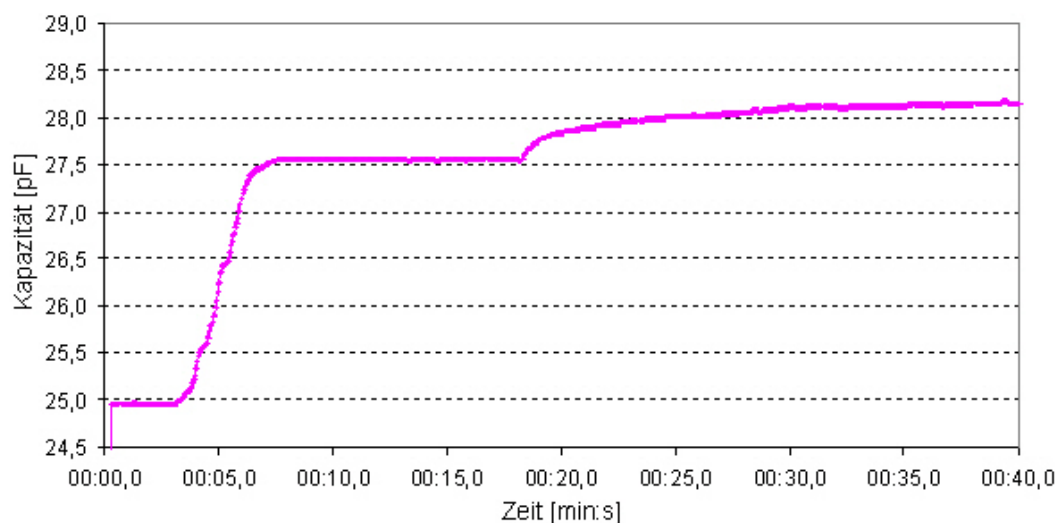
Die Kalibrierung wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

- Einfüllen der abgemessenen Sandmenge in den mit einem Stopfen verschlossenen Trichter;
- Öffnen des Trichters und Start der Messwertaufnahme;
- Einschalten der Siebmaschine nach Befüllen des Kalibrierbehälters;
- Ausschalten der Maschine und Beenden der Messwertaufnahme;
- Bestimmen der Höhenabnahme an der im Gefäß angebrachten Millimeterskala.



**Bild 14: Versuchsaufbau zur Sensorkalibrierung**

Im **Bild 15** ist ein typischer Kurvenverlauf dargestellt. Das nach dem kontinuierlichen Anstieg folgende Level entspricht der Schüttdichte. Das sich anschließende obere Level ist der Vibrationsdichte gleichzusetzen.



**Bild 15: Einfüll- und Verdichtungsvorgang**

Der formelmäßige Zusammenhang zwischen den gemessenen Kapazitäten und den diesen entsprechenden Dichtewerten ist in der Gleichung (3) dargestellt:

$$D = f(C) = a * C \quad (3)$$

| Versuch            | Kapazität 0 [pF] | Kapazität 1 [pF] |
|--------------------|------------------|------------------|
| K1                 | 24,88            | 27,56            |
| K2                 | 24,84            | 27,44            |
| K3                 | 24,84            | 27,49            |
| K4                 | 24,89            | 27,50            |
| K5                 | 24,91            | 27,51            |
| K6                 | 24,91            | 27,52            |
| K7                 | 24,92            | 27,46            |
| K8                 | 24,91            | 27,50            |
| K9                 | 24,91            | 27,49            |
| K10                | 24,95            | 27,48            |
| K11                | 24,95            | 27,55            |
| K12                | 24,93            | 27,54            |
| K13                | 25,01            | 27,58            |
| K14                | 24,99            | 27,49            |
| Mittelwert         | 24,92            | 27,51            |
| Standardabweichung | ± 0,0467         | ± 0,0375         |

**Tabelle 1: Messwerte für die Schüttdichte–Kalibrierung**

In der **Tabelle 1** sind die beim Einfüllvorgang gemessenen Kapazitäten am Beispiel des Sensor **2** dargestellt, es wurden jeweils 14 Kalibrierversuche durchgeführt und ausgewertet. Dabei entsprechen die unter **Kapazität 0** aufgelisteten Werte den bei einer Sanddichte von 0 g/cm<sup>3</sup> gemessenen Kapazitäten, d. h., bei diesem Sand losem Zustand sind das die Kapazitätswerte der umgebenden Luft. Die Werte, die unter **Kapazität 1** aufgelistet sind, wurden bei der Schüttdichte von 1,46 g/cm<sup>3</sup> gemessen.

Die Schüttdichte als Funktion der Kapazität ist in der Gleichung (4) dargestellt:

$$D_S = f(C) = a_0 * \Delta C \quad (4)$$

Hierin bedeuten:

$D_S$  – Schüttdichte als Funktion der Kapazität

$\Delta C$  – Kapazitätsänderung [pF]

$a_0$  – Anstieg der Geraden

wobei:

$$a_0 = (D_S - D_0) / (C_S - C_0) = D_S / (C_S - C_0) \quad (5)$$

Hierin bedeuten:

$D_S$  – Mittelwert der Schüttdichte (Dichte 1)

$D_0$  – Schüttdichte zu Beginn des Versuchs (Zeitpunkt: 0), hier:  $D_0 = 0$

$C_S$  – Mittelwert der bei erreichter Schüttdichte gemessenen **Kapazität 1**

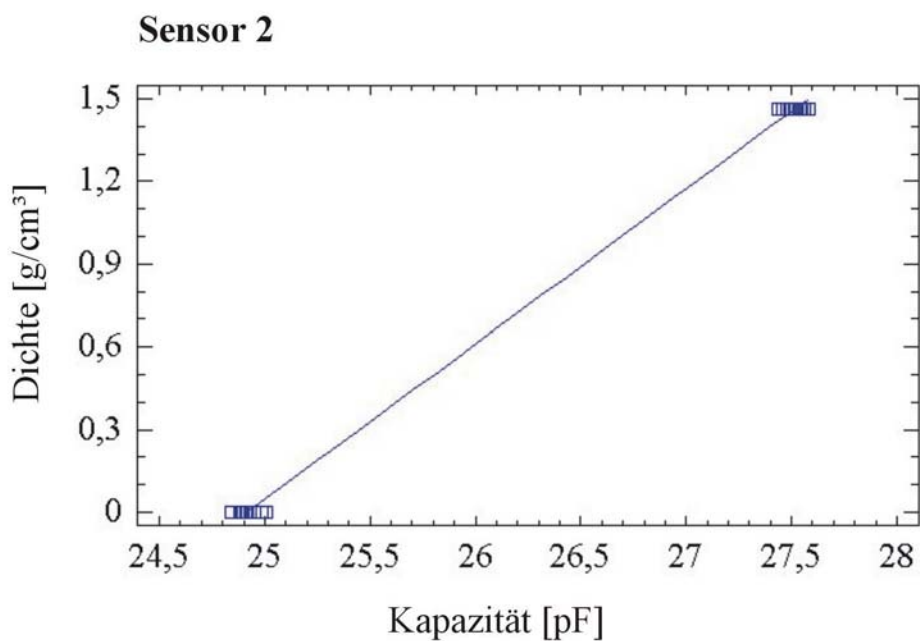
$C_0$  – Mittelwert der zu Beginn des Versuchs gemessenen **Kapazität 0** (Luft)

$$a_0 = 1,46 \text{ g/cm}^3 / (27,51 - 24,92) \text{ pF} = 0,56 \text{ g/(cm}^3\text{pF)}$$

Damit ergibt sich die Geradengleichung für die Berechnung der Schüttdichte:

$$D_S = 0,56 * C_S \quad (6)$$

Die Zusammenhänge zwischen den Kapazitäts- und Schüttdichtewerten sind im **Bild 16** grafisch dargestellt.



**Bild 16: Kalibrierung „Schüttdichte“**

Die gemessenen und berechneten Vibrationsdichtewerte sind wieder am Beispiel des Sensors **2** in der **Tabelle 2** zusammen gefasst.

| Versuch            | Kapazität 2 [pF] | Dichte 2 [g/cm <sup>3</sup> ] |
|--------------------|------------------|-------------------------------|
| K1                 | 27,97            | 1,70                          |
| K2                 | 28,08            | 1,70                          |
| K3                 | 27,96            | 1,68                          |
| K4                 | 28,01            | 1,68                          |
| K5                 | 28,08            | 1,67                          |
| K6                 | 28,07            | 1,71                          |
| K7                 | 28,11            | 1,69                          |
| K8                 | 28,14            | 1,67                          |
| K9                 | 28,04            | 1,67                          |
| K10                | 28,11            | 1,65                          |
| K11                | 28,19            | 1,67                          |
| K12                | 28,32            | 1,67                          |
| K13                | 28,12            | 1,67                          |
| K14                | 28,32            | 1,67                          |
| Mittelwert         | 28,11            | 1,68                          |
| Standardabweichung | ±0,1056          | ±0,0160                       |

**Tabelle 2: Messwerte für die Vibrationsdichte–Kalibrierung**

Die Vibrationsdichte als Funktion der Kapazität ist in der Gleichung (7) dargestellt:

$$D_V = f(C) = a_1 \cdot \Delta C + D_S \quad (7)$$

Hierin bedeuten:

$D_V$  – Vibrationsdichte als Funktion der Kapazität

$a_1$  – Anstieg der Geraden

wobei:

$$a_1 = (D_V - D_S) / (C_V - C_S) \quad (8)$$

Hierin bedeuten:

$D_V$  – Vibrationsdichte als Funktion der Kapazität

$C_V$  – Mittelwert der bei erreichter Vibrationsdichte (**Dichte 2**) gemessenen **Kapazität 2**



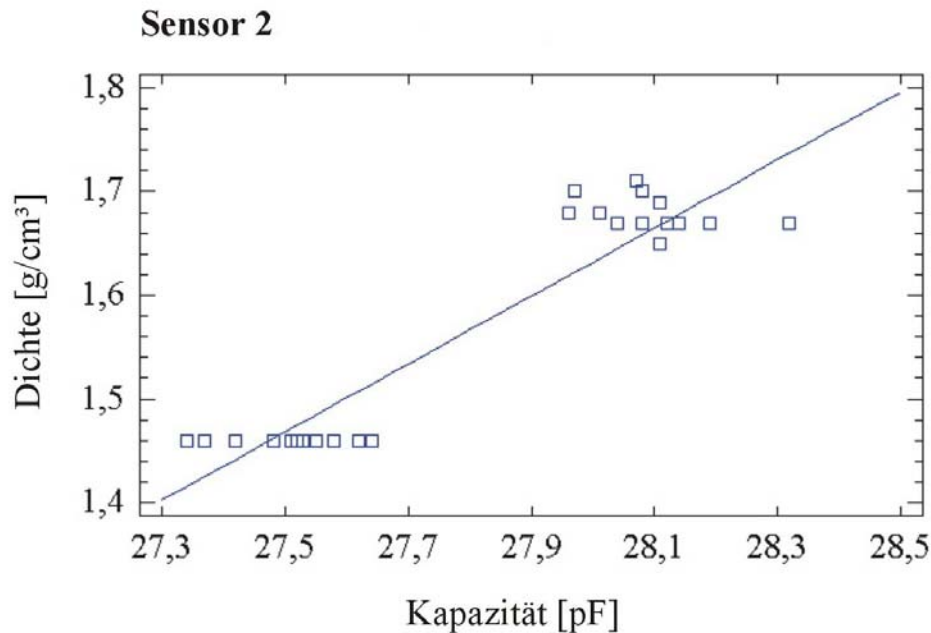
$C_S$  – Mittelwert der bei erreichter Schüttdichte gemessenen **Kapazität 1**

$D_S$  – Mittelwert der Schüttdichte (**Dichte 1**)

$$a_1 = (1,68 - 1,46) \text{ g/cm}^3 / (3,13 - 2,53) \text{ pF} = 0,37 \text{ g/(cm}^3\text{pF)}$$

Die Geradengleichung für die Berechnung der Vibrationsdichte lautet damit:

$$D_V = 0,37 * (C_V - C_S) + D_S \quad (9)$$



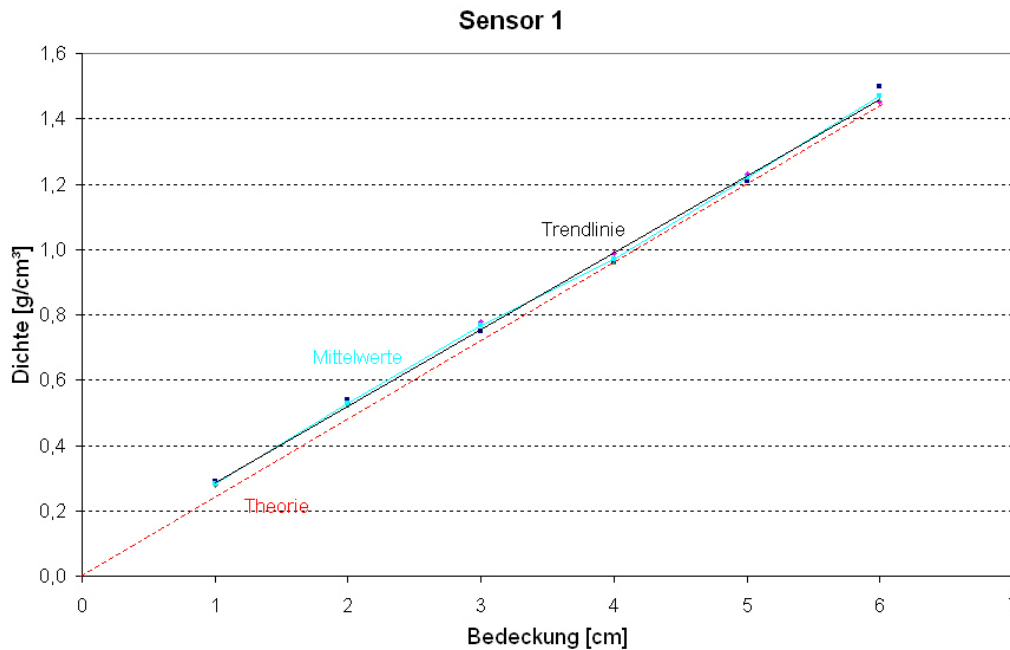
**Bild 17: Kalibrierung „Vibrationsdichte“**

Im **Bild 17** sind die Zusammenhänge zwischen den Kapazitäts- und Vibrationsdichtewerten grafisch dargestellt.

### 3.1.2. Linearität der Sensoren

Für die Bewertung der erzielten Ergebnisse ist es ebenfalls wichtig zu wissen, wie sich eine nur teilweise Bedeckung des Sensors mit dem Formsand auf die ermittelten Dichtewerte auswirkt. Gemäß der Formel (2):  $C = A * \epsilon / d$  ist die gemessene Kapazität von der an der Messung beteiligten Fläche (Sensorfläche) abhängig. Wie aber der Darstellung im **Bild 13** entnommen werden kann, ist die Längenausdehnung des Sensors gegenüber der Breite die bestimmende Größe, weshalb zu erwarten ist, dass mit zunehmendem Anteil der mit Sand bedeckten Sensorlänge der gemessene Dichteanteil linear bis zur Schüttdichte (bei vollständiger Sensorbedeckung) ansteigt.

Für die Überprüfung des Linearverhaltens der Sensoren wurde der gleiche Versuchsaufbau wie beim vorangegangenen **Pkt. 3.1.1. (Kalibrierung der Sensoren – Bild 14)** genutzt, nur dass auf der Rückseite der Sensoren eine cm-Skala angebracht wurde (von unten nach oben aufsteigend, d. h., 1 cm entspricht einer 1/6-Bedeckung des Sensors). Pro Bedeckungsgrad wurden die Schüttdichten jeweils dreimal ermittelt, um eine gewisse statistische Sicherheit der ermittelten Werte zu haben.

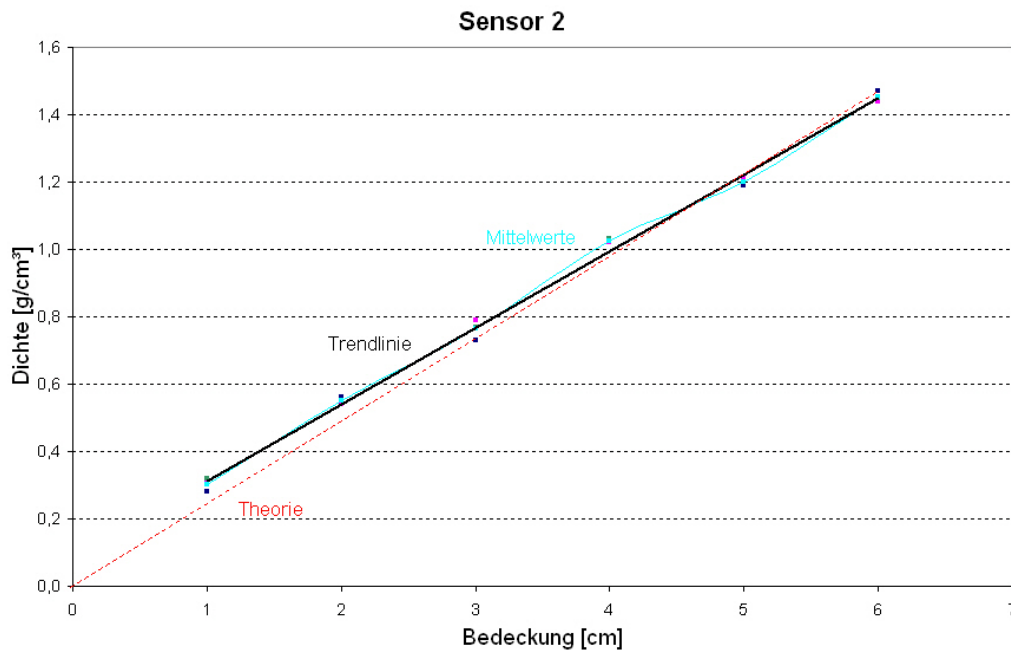


**Bild 18: Linearverhalten des Sensors 1**

Die für den Sensor pro Bedeckungsgrad errechneten mittleren Dichtewerte wurden in jeweils einem Diagramm dargestellt, die sich ergebende Trendlinie hereingelegt und diese der theoretischen Kennlinie gegenübergestellt.

Die im **Bild 18** für den Sensor 1 ermittelte Trendlinie besitzt ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9992$  und berechnet sich aus der Formel  $y = 0,2345 x + 0,0527$ , d. h., bei diesem Sensor nimmt die Dichte pro bedecktem cm um  $0,2345 \text{ g/cm}^3$  zu. Dem Ergebnis kann nun die theoretische Kennlinie gegenübergestellt werden, die sich aus dem Zusammenhang ergibt, dass bei einer vollständigen Bedeckung des 6 cm langen Sensors die Schüttdichte von  $1,46 \text{ g/cm}^3$  erreicht wird. Das bedeutet eine Dichtezunahme von  $0,2433 \text{ g/cm}^3$  pro bedecktem Zentimeter und für die Theorielinie einen etwas steileren Verlauf ( $y = 0,2433 x$ ). Setzt man den Anstieg der Trendlinie zu dem der theoretischen Linie ins Verhältnis, so ergibt sich ein Anstiegsverhältnis von 96,40 %, d. h., das Linearverhalten des Sensor 1 entspricht zu 96,40 % den theoretischen Erwartungen.

Für den Sensor **2** wurde im Diagramm (**Bild 19**) eine Trendlinie mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9983$  ermittelt und die zu dieser Linie gehörige Formel berechnet sich aus  $y =$



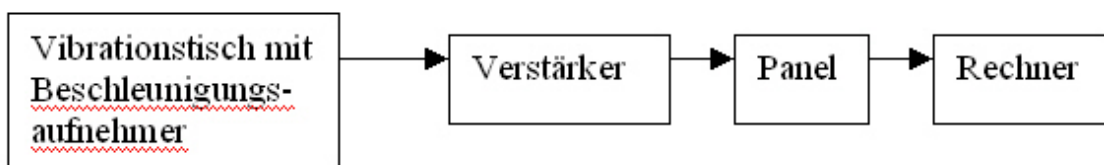
**Bild 19: Linearverhalten des Sensors 2**

$0,2274 x + 0,0862$ , d. h., bei diesem Sensor nimmt die Dichte pro bedecktem Zentimeter um  $0,2274 \text{ g/cm}^3$  zu. Damit ist der Anstieg noch etwas geringer als beim Sensor **1** und das vergleichbare Anstiegsverhältnis ergibt einen Wert von  $93,46 \%$ , d. h., die theoretischen Erwartungen werden durch den Sensor **2** zu  $93,46 \%$  erfüllt.

### 3.2. Beschleunigungsmessungen

Wie bereits Nikolov /54/ in seiner Dissertation feststellte, sind die bei den Vibrationsversuchen auftretenden Beschleunigungen (Frequenzen, Amplituden) von großer Bedeutung für das Be- und Hinterfüllen von Modellhohlräumen und –hinterschneidungen sowie für die erzielbaren Sandverdichtungen. Am Besten geeignet für die Durchführung der Beschleunigungsmessungen sind piezoelektrische Messfühler auf Quarzbasis, die eine Spannung abgeben, die proportional der Beschleunigung längs ihrer Achse ist. Bewegungen senkrecht zur Längsachse werden nicht registriert, daher können die Bewegungen des Vibrationstisches in seinen einzelnen Freiheitsgraden genau bestimmt werden. Um Verfälschungen durch die Eigenmasse der Aufnehmer zu vermeiden, wurden für die Beschleunigungsmessungen miniaturisierte und damit nahezu Masse lose Aufnehmer vom Typ Piezotronic verwendet.

Eine Stromversorgungseinheit liefert die erforderliche Betriebsspannung von 24 V für die eingebauten **Verstärker** der Beschleunigungsaufnehmer und trennt gleichzeitig die Gleichstromspannung vom Messsignal. Das gemessene Signal wird über einen BNC-Stecker zu einem Anschlusspanel mit 8 Analogeingängen (Signale im Bereich zwischen +5 V und –5 V) geleitet. Vom **Panel** gelangen dann die Signale zu einer in einem **Rechner** eingebauten Steckkarte mit 16 Analogeingängen und 12 bit Auflösung. Auf dieser Karte befinden sich ein Multiplexer, d. h., die Abfrage der einzelnen Kanäle erfolgt schrittweise, und ein AD-Wandler, mit dessen Hilfe die Messergebnisse digitalisiert und in dieser Form in ASCII-Dateien abgespeichert werden. (*Bild 20*)



**Bild 20:** Flussbild zur Messwerterfassung

Als Software für die Aufnahme der Daten wird ebenfalls ein DASyLab-Programm benutzt. Das Programm ermöglicht bei der Messung mit nur einem Beschleunigungsaufnehmer Abtastraten bis 1381 Hz d. h., 1381 Ablesevorgänge pro Sekunde. Gemäß der vom Hersteller durchgeführten Kalibrierung werden die Messwerte mit einem jeweils vorgegebenen Faktor multipliziert und sofort in Einheiten der Beschleunigung umgerechnet, die dann am Rechnerbildschirm graphisch dargestellt werden können.

## 4. Vibrationsuntersuchungen

### 4.1. Glaskugelproblematik

Bisher wurde der von der TU Bergakademie entwickelte Sensor (**Pkt. 2.6.2. Sensoren zur Untersuchung der Verdichtungseigenschaften – Messprinzip**) ausschließlich für die Dichtemessung von Formsand, der in seiner Charakteristik einem Mehrkomponentengemisch entspricht, eingesetzt. Dabei drängt sich förmlich die Frage auf, ob dieser Sensor auch für die Messung von so genannten Einkorngemischen geeignet ist. Für diese Eignungsüberprüfung wurden Glaskugeln als das zu untersuchende Einkorngemisch ausgewählt. Die Wahl fiel deshalb auf diese Kugeln, weil ebenfalls wie beim Quarzsand die Hauptkomponente aus SiO<sub>2</sub> besteht.

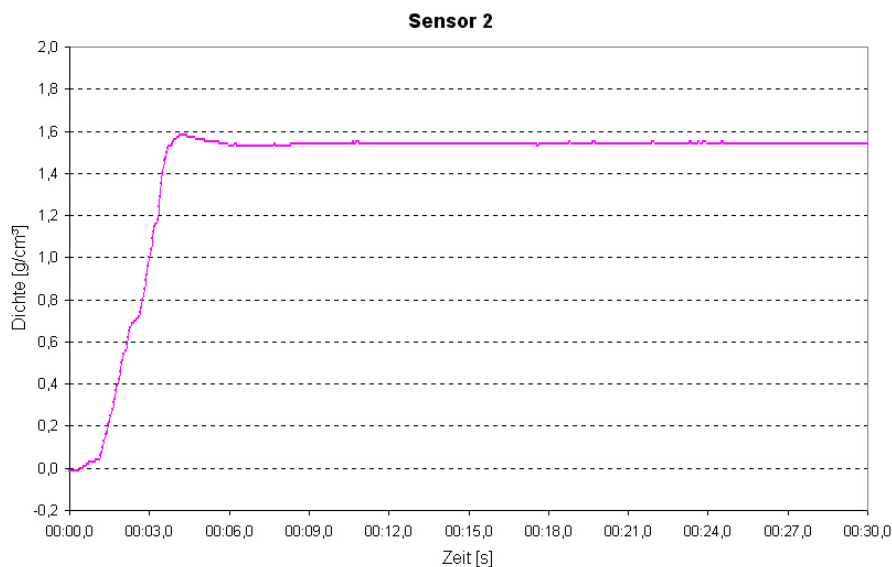
#### 4.1.1. Aufgabenstellung

Ausgehend von dem mit Binder losem Formsand bekanntem Verhalten gilt es als Erstes zu überprüfen, ob mit den Sensoren und der angeschlossenen Messtechnik auch reproduzierbare Werte gemessen werden können. Dem sollte sich eine Kalibrierung und Prüfung des Linearverhaltens der Sensoren anschließen. Wichtig ist auch zu prüfen, inwieweit sich die Glaskugeln unter dem Einfluss einer angelegten Vibration in Hohlräume und Hinterschneidungen hinein bewegen und eventuell auch verdichten lassen. Gibt es dabei auffällige Frequenzbereiche (Resonanzen) zu beobachten? Welche Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede zum Formsand sind erkennbar? Wie ist das Schwerkraftverhalten der Glaskugeln?

#### 4.1.2. Überprüfung der Sensoren

Die bisher verwendeten Sensoren wurden nun auf deren Eignung für die vorgesehenen Untersuchungen zum Formfüllverhalten der Glaskugeln überprüft. Anhand der Reproduzierbarkeit der gemessenen Schüttdichte–Kapazitätswerte wurde kontrolliert, ob denn der für den jeweiligen Sensor am Messgerät eingestellte optimale Messbereich und die darauf abgestimmte Messfrequenz auch für den neuen Formstoff (Glaskugeln) geeignet ist. Es stellte sich heraus, dass die Sensoren ohne größere Korrekturen der Messfrequenzen verwendet werden konnten. Der Unterschied zum Formsand besteht in einer geringeren Schüttdichte–Kapazität.

Die Umwertung der gemessenen Kapazitäten in die interessierenden Dichtewerte erfolgte auf der Basis der auf herkömmlicher Art ermittelten Dichte (ein bekanntes Volumen wird gefüllt

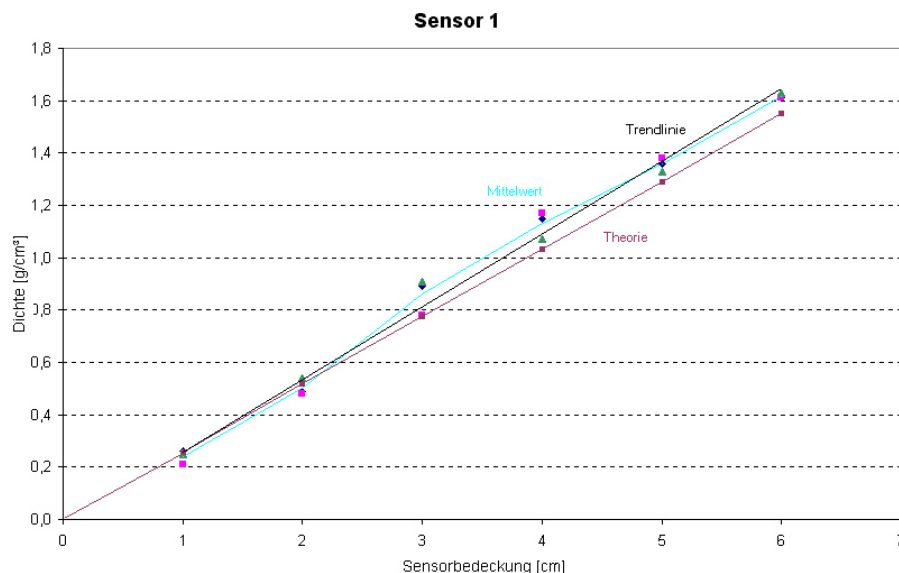


**Bild 21: Schüttdichte**

und der Inhalt gewogen), die durch die entsprechende Kapazität dividiert wird. Der ermittelte Faktor wird im Rechner einprogrammiert, so dass die Kurven als Dichtewerte aufgenommen und gespeichert werden können (**Bild 21**).

Für die Überprüfung der Sensoren wurde wieder der von den Formsandversuchen bewährte und im **Bild 14** unter **Pkt. 3.1.1. Kalibrierung der Sensoren** dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Analog gilt das auch für das Linearverhalten der Sensoren, dass auf der Basis der unter **Pkt. 3.1.2. Linearität der Sensoren** beschriebenen Verfahrensweise ermittelt wurde.

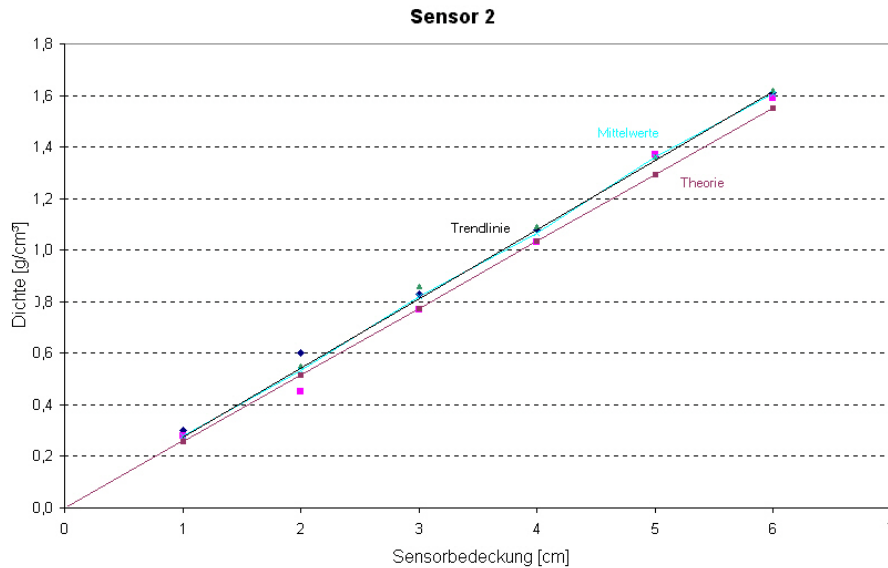
Die für den Sensor pro Bedeckungsgrad errechneten mittleren Dichtewerte wurden ebenfalls in jeweils einem Diagramm dargestellt, die sich ergebende Trendlinie hereingelegt und diese einer theoretischen Kennlinie gegenübergestellt.



**Bild 22: Linearität Sensor 1**

Die im **Bild 22** sichtbare Trendlinie hat ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9955$  und berechnet sich aus der Formel  $y = 0,2775 x - 0,0202$ , d. h., bei diesem Sensor nimmt die Dichte pro bedecktem cm um  $0,2775 \text{ g/cm}^3$  zu. Die Theorielinie verläuft etwas flacher mit  $y = 0,2583 x$ , was eine Dichtezunahme von  $0,2583 \text{ g/cm}^3$  pro bedecktem cm bedeutet. Setzt man die theoretische Linie zur Trendlinie ins Verhältnis, so erhält man ein Anstiegsverhältnis von 93,08 %.

Die im **Bild 23** sichtbare Trendlinie hat ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9995$  und berechnet sich aus der Formel  $y = 0,2677 x + 0,008$ , d. h., bei diesem Sensor nimmt die Dichte pro bedecktem cm um  $0,2677 \text{ g/cm}^3$  zu. Setzt man nun die theoretische Linie (gleiche Parameter wie bei **Bild 22**) zur Trendlinie ins Verhältnis, so erhält man ein Anstiegsverhältnis von 96,49 %.



**Bild 23: Linearität Sensor 2**

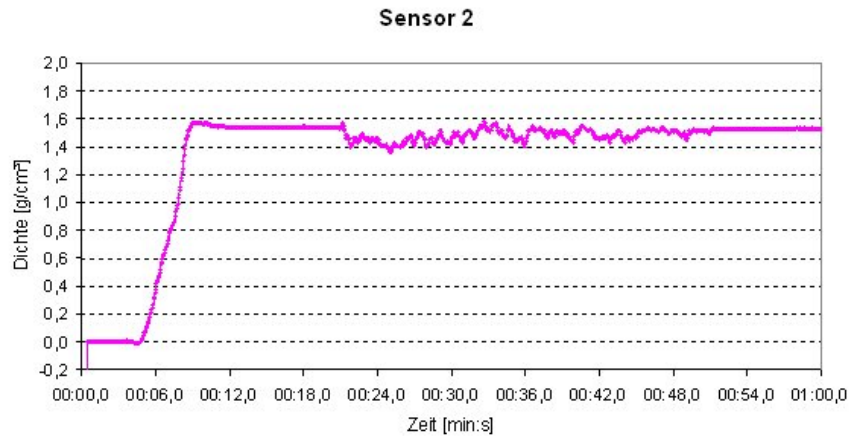
Es konnte damit ein linearer Zusammenhang zwischen dem Bedeckungsgrad und der gemessenen Dichte nachgewiesen werden.

#### 4.1.3. Überprüfung der Verdichtbarkeit

Um mögliche Parallelen zum Formsand zu prüfen, wurde in einer ersten Untersuchung die Fraktionierung der Glaskugeln, die aus dem Umlauf entnommen waren, durchgeführt. Das Ergebnis zeigte eine Zweiteilung zwischen der Fraktion  $\geq 2,0$  mm mit einem Anteil von 75,7 % und der  $< 2,0$  mm und  $\geq 1,6$  mm mit dem Restanteil. Mit dieser sehr stark eingeschränkten Bandbreite der Korngrößenverteilung unterscheiden sich die Glaskugeln schon wesentlich vom Formsand und geben damit einen ersten Hinweis darauf, dass eine vergleichbare Verdichtung nicht eintreten wird, da hier der dafür erforderliche Feinanteil einfach nicht existiert.

Zur Überprüfung dieses zu erwartenden Ergebnisses wurde der gleiche Versuchsaufbau wie unter **Pkt. 3.1.1. (Kalibrierung der Sensoren)** gewählt (**Bild 14**).

Die aufgenommenen Kurven zeigen ein Pendeln des Dichtewertes auf Schüttdichteniveau, das stets mit einer geringfügigen Auflockerung beginnt und auf die Kugelbewegungen zurück geführt werden kann. Mit Abschalten der Erregung stellt sich die Schüttdichte (**Bild 24**) wieder ein, dabei betragen auftretende Abweichungen in positiver Richtung max. 5 % und in negativer Richtung ca. 10 %, d. h., auch bei gleichen Versuchsbedingungen schwanken die Werte innerhalb dieses Bereiches, so dass keine eindeutigen Tendenzen zu erkennen sind. Damit ist eine mit dem Formsand vergleichbare Verdichtbarkeit der Glaskugeln nicht gegeben.



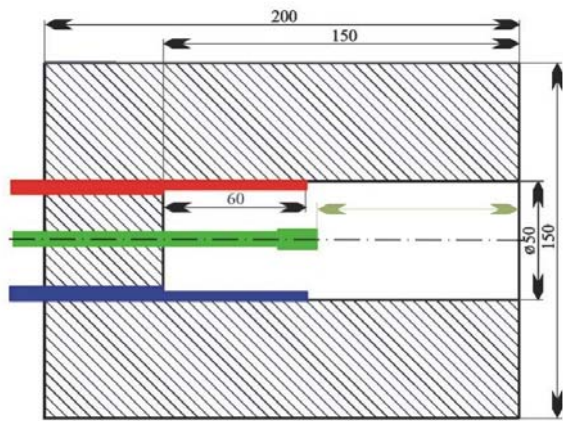
**Bild 24: Kurvenverlauf Sensor 2**

Da für das Verhalten von Glaskugeln unter Vibrationseinfluss keine Erfahrungswerte vorlagen, wurde vor der eigentlichen Versuchsdurchführung der mögliche Frequenzbereich getestet. Dazu wurde der Behälter (ohne Modell) mit Glaskugeln gefüllt und, von niedriger Frequenz ( $f \geq 0$  Hz) beginnend, vibriert. Dabei wurde oberhalb von 12 Hz bis 13 Hz eine heftige Bewegung des Formkastens und der sich darin befindlichen Glaskugeln, die auf der Oberfläche zu hüpfen begannen, beobachtet. Oberhalb von 13 Hz beruhigte sich das Ganze wieder und ab ca. 20 Hz wurde der zaghafte Beginn einer Glaskugelbewegung beobachtet, die mit der Steigerung der Frequenz weiter zunahm. Ab ca. 40 Hz bewegten sich die Kugeln wieder heftiger, so dass der zu untersuchende Frequenzbereich von 20 Hz in 5er Schritten bis 40 Hz festgelegt wurde. Der bei 12 ... 13 Hz wegen der gemachten Beobachtungen zu vermutende Resonanzfall wurde hier nicht in eine nähere Betrachtung einbezogen, weil auf Grund des „Hüpfens“ der Glaskugeln ein beträchtlicher Teil auch aus dem Behälter sprang.

#### 4.1.4. Prüfkörper/Modelle

Für die Beurteilung des Formfüllvermögens der Glaskugeln war es wichtig zu wissen, wie ist deren grundsätzliches Verhalten in Bezug auf die horizontale bzw. vertikale Bewegungsrichtung. Und dass sollte an Hand eines einmal waagerecht liegenden bzw. zum anderen senkrecht nach unten weisenden Hohlraumes, den es mittels Vibration zu befüllen galt, nachgewiesen werden. Für diese Untersuchungen fertigte man als Versuchsmodelle spezielle Prüfkörper mit den Abmessungen 150 mm x 150 mm x 200 mm an, in die jeweils ein Hohlraum von 150 mm Länge und 50 mm Durchmesser eingearbeitet wurde (**Bild 25**), da hier die bei Formsand-Versuchen üblichen Styropor-Modelle nicht geeignet waren.



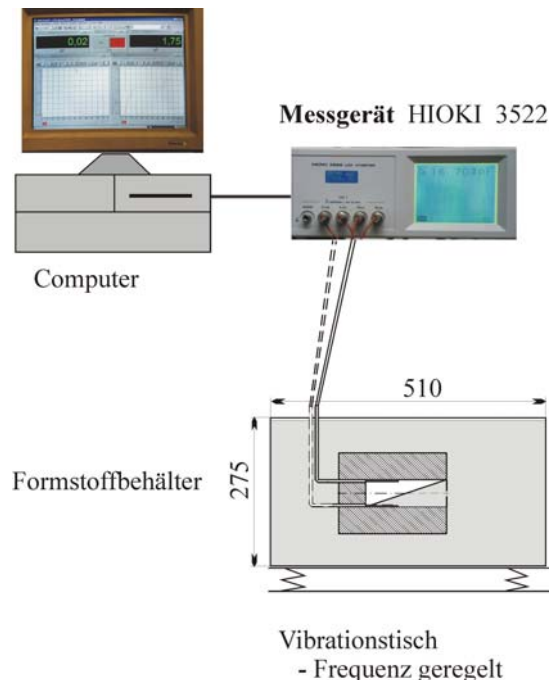


**Bild 25: Prüfkörper mit den Varianten der Sensorbestückung**

In dem Formkörper für die waagerechte Einformlage wurde der Sensor so befestigt, dass er sowohl in **oberer** Lage und als auch in **unterer** Lage (durch eine 180 °–Drehung des Körpers um seine Achse) eingesetzt werden konnte. Denn wie Probeversuche zeigten, ist ein gleichzeitiges Messen mit zwei gegenüber befestigten Sensoren nicht machbar, weil auf Grund des zu geringen Abstandes der Messflächen zueinander sich deren Messwerte gegenseitig beeinflussen.

Für die senkrechte Einformlage wurde der **Sensor** in der Mittenachse des Prüfkörpers mit variierbarer **Einbauhöhe** positioniert.

#### 4.1.5. Waagerechte Einformlage



**Bild 26: Versuchsaufbau mit waagerechtem Prüfkörper**

Der Prüfkörper wurde dergestalt eingeformt: In einen auf dem Vibrationstisch verspannten Formstoffbehälter wird der Körper waagrecht und in etwa mittig auf eine Bettschicht gelegt, dabei befindet sich der Sensor in oberer oder unterer Lage (gestrichelt). Anschließend wird der Behälter, dessen nicht in der Skizze im **Bild 26** angegebenen Tiefe 405 mm beträgt, gefüllt. Danach wird die vertikale Vibration mit der gewählten Frequenz gestartet.

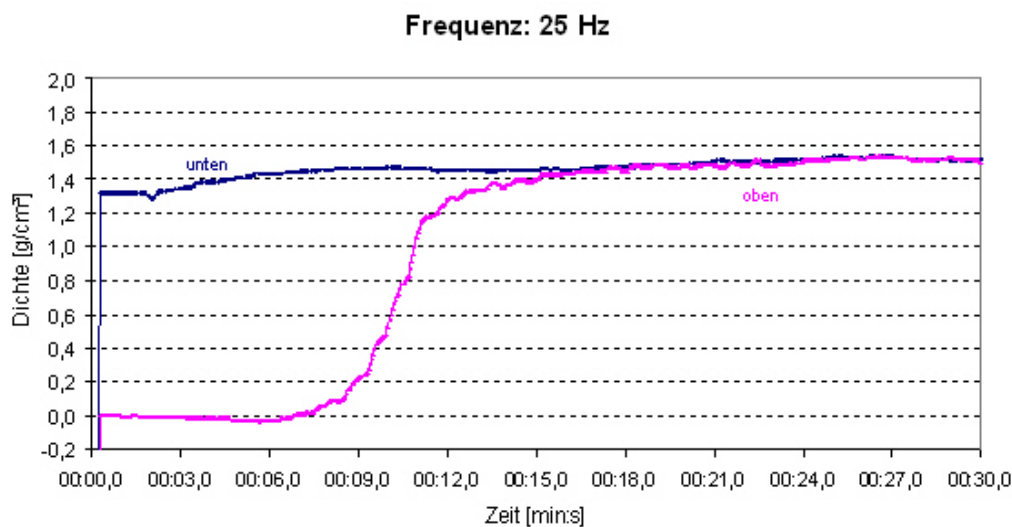
Das vom Sensor aufgenommene Messsignal wurde wieder vom LCR–Messgerät aufgenommen und über die RS–232–Schnittstelle zum PC weiter geleitet. Die Erregung des verwendeten Vibrationstisches erfolgt unter Nutzung zweier gegenläufiger, Frequenz geregelter Unwuchtvibratoren, deren mögliche Scheibenverstellung hier eine Amplituden- und somit auch Beschleunigungsvariation gestatten würde, auf die aber hier bei diesen Versuchen ver-

ter Unwuchtvibratoren, deren mögliche Scheibenverstellung hier eine Amplituden- und somit auch Beschleunigungsvariation gestatten würde, auf die aber hier bei diesen Versuchen ver-

zichtet wurde.

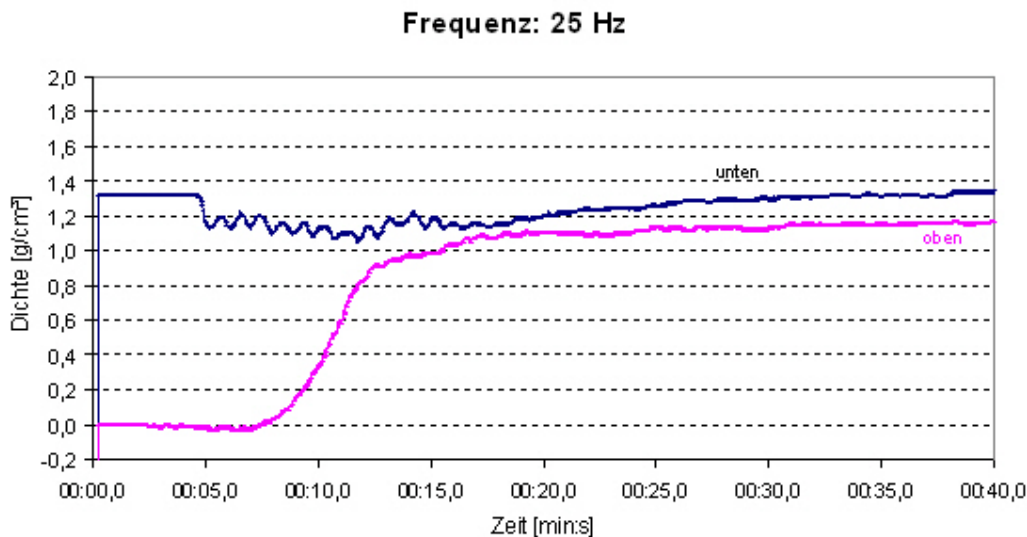
Die Versuche wurden in vier verschiedenen Einformhöhen (Glaskugelsäulenhöhen), definiert durch den Abstand der Oberkante des Prüfkörpers zur obersten Glaskugelschicht (OK), durchgeführt. Auf Grund der vorgegebenen Außenmaße des verwendeten Modells, und da mindestens eine Grund- bzw. Bettschicht von ca. 1 cm eingefüllt werden sollte, ergab sich eine maximale Säulenhöhe von 11 cm.

Pro Einformhöhe wurden die Versuche jeweils in oberer und unterer Sensorlage durchgeführt und für die Auswertung der dabei erzielten Ergebnisse in Bezug auf das Vermögen, den waagerechten Hohlraum zu füllen, in einem Diagramm zusammen gefasst.



**Bild 27: Kurvenverlauf bei einer Säulenhöhe von 11 cm**

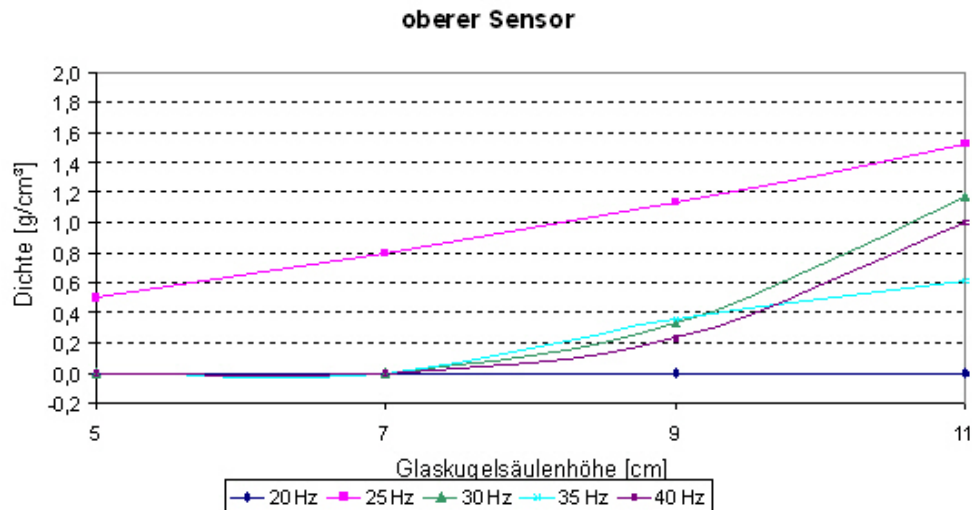
Im **Bild 27** wird deutlich, dass bereits beim Einfüllen der Glaskugeln der untere Sensor zu 5/6 bedeckt wird, d. h., die Kugeln rollen nahezu bis ans Ende der Höhlung (im **Bild 25** mit dem „Schüttkegel“ dargestellt). Nach einer Vibrationszeit von ca. 5 s wird am **unteren Sensor** die Schüttdichte erreicht, währenddessen am **oberen Sensor** dessen Bedeckung beginnt, um danach rasch zuzunehmen und nach weiteren 10 s ebenfalls das Schüttdichteniveau zu erreichen. Damit ist bei dem Versuch, unter den gewählten Bedingungen einer Säulenhöhe von 11 cm und einer Erregerfrequenz von 25 Hz, der Füllvorgang nach insgesamt 15 s beendet. Der nachfolgende geringfügige Anstieg bewegt sich im „+ 5 %“-Bereich (s. auch **Pkt. 4.1.3. Überprüfung der Verdichtbarkeit**) und lässt eine dem entsprechende Bewertung zu.



**Bild 28: Kurvenverlauf bei einer Säulenhöhe von 9 cm**

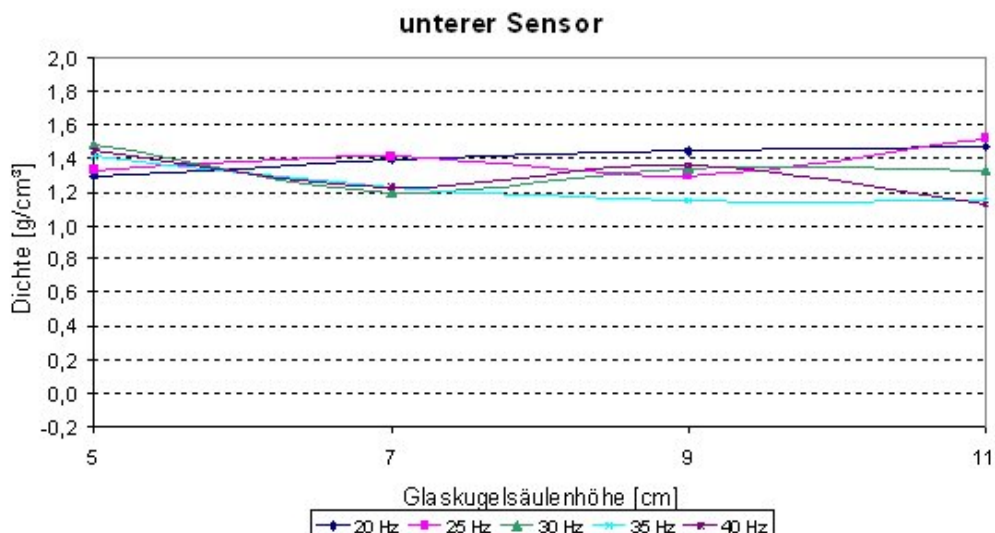
Im **Bild 28** wird sichtbar, dass bereits eine um 2 cm niedrigere Säulenhöhe dazu führt, dass die Glaskugeln bei gleicher Erregerfrequenz die Höhlung nicht mehr vollständig füllen. In der **unteren Lage** bewegen sie sich erst ein wenig nach außen, was als ein Hinweis auf einen Adhäsionseffekt gewertet wird, um nach ca. 11 s Vibrationsdauer, wo die Messwerte des **oberen Sensors** sich dem Niveau des **unteren** angenähert haben, wieder anzusteigen und nach weiteren 11 s im Bereich des **unteren Sensors** das „Schüttkegel“-niveau wieder zu erreichen. Ausgehend von **diesem Level** fehlen hier bis zur Schüttdichte noch ca. 10 %, das könnte noch als eine „– 10 %“-Abweichung analog **Pkt. 4.1.3. Überprüfung der Verdichtbarkeit** interpretiert werden; aber die Messwerte des **oberen Sensors** liegen nochmals um ca. 10 % tiefer, so dass somit die unvollständige Hohlraumbefüllung eindeutig nachgewiesen ist.

Im **Bild 29** wird die Abhängigkeit der mit dem oberen Sensor gemessenen Dichtewerte, die nach **Pkt. 4.1.2. Überprüfung der Sensoren** einem bestimmten Bedeckungsgrad des Sensors entsprechen, von der Frequenz und der Glaskugelsäulenhöhe deutlich sichtbar. Dabei fällt insbesondere auf, dass mit der Frequenz von **25 Hz** offenbar die Maxima erzielt wurden, die zudem noch einen linearen Anstieg mit wachsender Säulenhöhe aufzeigen, während bei **20 Hz** die Kugeln unabhängig von der Glaskugelsäulenhöhe den Sensor überhaupt nicht erreichen. Die Kurvenverläufe der übrigen Frequenzen weisen untereinander keine großen Unterschiede auf, bestätigen aber die Zunahme des Bedeckungsgrades mit wachsender Säulenhöhe. Damit gibt es wieder eine Gemeinsamkeit mit dem Formsand, denn mit zunehmender nachdrückender Masse, die ihren Ausdruck in der Säulenhöhe findet, wird der Hohlraum besser gefüllt, d. h., der Schwerkrafteinfluss ist unverkennbar.



**Bild 29: Säulenhöhe – Frequenz – Dichte**

Im **Bild 30** sind keine eindeutigen Abhängigkeiten bzw. Einflüsse sichtbar, die Werte pendeln hier allgemein um  $1,3 \text{ g/cm}^3$ , was einem Bedeckungsgrad von 90 % entspricht und die teilweise schon durch das Einfüllen der Glaskugeln erreicht werden. Der sich bildende „Schüttkegel“ bedeckt in den meisten Fällen den unteren Sensor mit einem Anteil von 5/6-teln, beim Vibrieren bewegen sich die Glaskugeln auf Grund wirkender Adhäsionskräfte erst in Richtung Ausgang, ehe sie dann von den von Außen nachdrückenden Glaskugeln wieder in den Hohlraum zurück gedrückt werden. Nur bei **25 Hz** wird bei der Säulenhöhe von 11 cm die Schüttdichte, d. h., die komplette Sensorbedeckung erreicht.

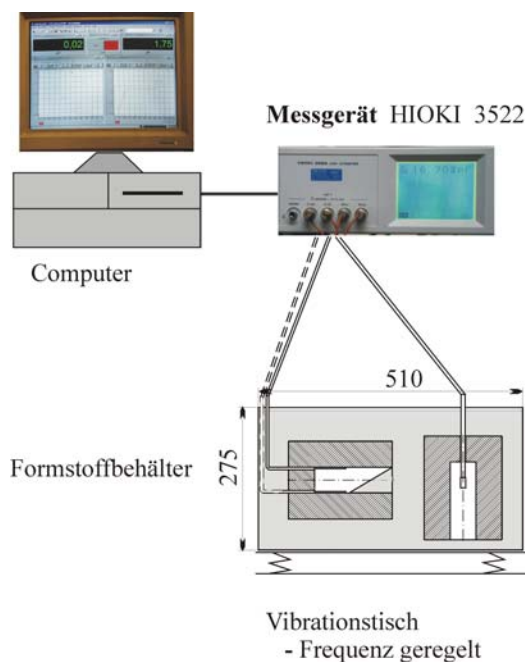


**Bild 30: Säulenhöhe – Frequenz – Dichte**

Im Gegensatz zum Quarzsand kommt es bei den Glaskugeln zu keiner Ausbildung eines Schüttkegels mit einem definiertem, reproduzierbarem Schüttwinkel. Dieses Verhalten ist der Tatsache geschuldet, dass zum Einen regelmäßig geformte Körper, die Kugeln nun einmal

sind, einen sehr geringen Rollwiderstand haben und sie deshalb auf ebenen Flächen mit geringstem Energieaufwand in Bewegung zu versetzen sind. Zum Anderen besitzen diese Kugeln eine sehr feste und glatte Oberfläche, die einen sehr niedrigen Haftreibungskoeffizienten zur Folge hat, die ihrerseits nun bewirkt, dass die Glaskugeln gut aneinander gleiten. Beides zusammen führt letzt endlich dazu, dass die Kugeln beim Befüllen nahezu wie eine Flüssigkeit auseinander fließen und keinen Schüttkegel wie der Quarzsand bilden. Für unsere Versuche bedeutete das, dass ein waagerechter Hohlraum schnell am Boden nahezu vollständig (5/6–tel Sensorbedeckung) mit Glaskugeln bedeckt wird. An der Oberkante können sich die Kugeln nicht so ungehindert ausbreiten, so dass sich von der Öffnung in den Hohlraum hinein eine Art „Schüttkegel“ ausbildet, der allmählich in die den Boden deckende Schicht übergeht.

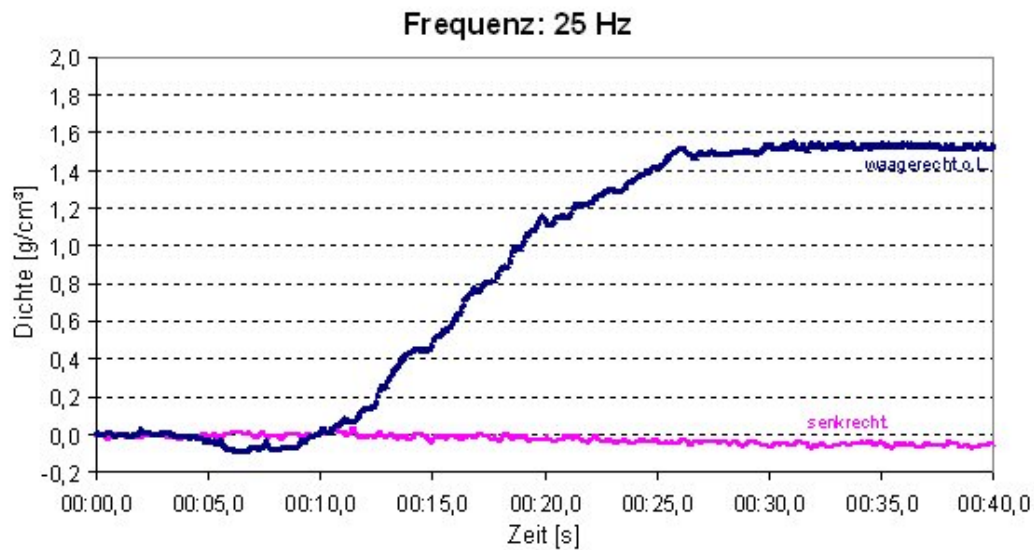
#### 4.1.6. Senkrechte Einformlage



**Bild 31: Versuchsaufbau waagerechter und senkrechter Prüfkörper**

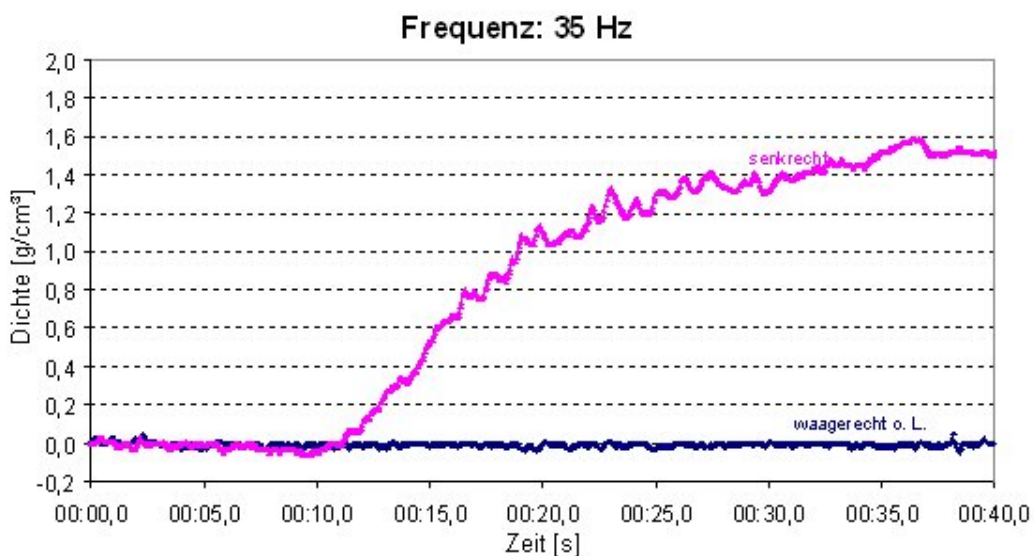
Der Versuchsaufbau ist analog zu **Pkt. 4.1.5. Waagerechte Einformlage**, nur hier wurde der Prüfkörper senkrecht eingeformt und der waagerechte Körper zu Vergleichszwecken zusätzlich „drin gelassen“ (**Bild 31**). Zur Lage im Formstoffbehälter ist zu sagen, dass beide Körper mit einem Abstand von ca. 5 cm voneinander eingeformt wurden. Bei den Versuchen wurden die Glassäulenhöhe und die Einformlage des waagerechten Körpers (Sensor oben oder unten) variiert. Der Sensor im senkrechten Prüfkörper wurde in seiner Einbauhöhe (**Pkt. 4.1.4. Prüfkörper/Modelle – Bild 25**) verändert.

In der ersten Versuchsserie betrug die Säulenhöhe beim waagerechten 11 cm und beim senkrechten Körper 6 cm (Sensoreinbauhöhe: 10 cm). Der Sensor im waagerechten befand sich in der **oberen Lage** und zeigte bei 25 Hz in Bestätigung der Ergebnisse von **Pkt. 4.1.5. Waagerechte Einformlage** die Vollfüllung des Hohlraumes (**Bild 32**) an, während „senkrecht“ bei keiner Frequenz das „Null“-Niveau verlassen wurde.



**Bild 32: 1. Versuchsserie**

In der zweiten Serie betrug die Einformtiefe bei beiden Prüfkörpern 6 cm, der Sensor im senkrechten hatte eine Einbauhöhe von 5 cm. In Auswertung dieser Ergebnisse kann gesagt werden, dass hier der senkrechte Sensor ebenfalls bei 25 Hz komplett, bei 30 Hz unvollständig und bei 35 Hz wieder komplett bedeckt wurde. Der waagrechte (in oberer Lage) wurde bei keiner Frequenz, auch nicht teilweise bedeckt (**Bild 33**).

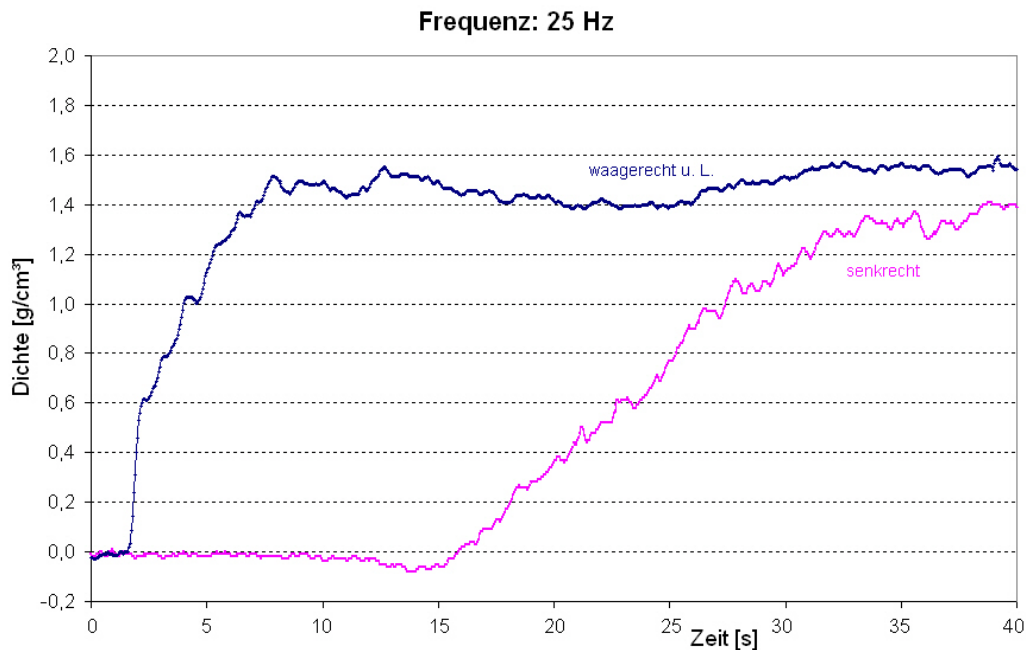


**Bild 33: 2. Serie**

In der dritten Versuchsserie betrug die Einformtiefe bei beiden Körpern 5 cm, die Einbauhöhe im senkrechten wurde nicht verändert. Beim waagerechten wurde die Sensorlage um 180 ° gedreht (**untere Lage**), das dazu führte, dass hier bei 25 und 30 Hz die Schüttdichte (**Bild 34**)



erreicht und bei den anderen Frequenzen Teil-Bedeckungen gemessen wurden. Beim **senkrechten** Sensor wurden auch bei 25 Hz nur Teilbedeckungen erreicht.



**Bild 34: 3. Serie**

Wie im **Bild 34** zu sehen ist, beginnt hier beim waagerechten Sensor (**untere Lage**) erst nach Einschalten dessen Bedeckung, was auf ein von den Versuchen unter **Pkt. 4.1.5. Waagerechte Einformlage** abweichendes Füllverhalten im Formkasten hinweist. Die Erklärung dafür ist, dass auf Grund des geringeren Abstandes der Öffnung des waagerechten Körpers (hier zum senkrechten Prüfkörper, dort zur Behälterwand) der Einfüllvorgang an der Öffnung (von deren Unter- zur Oberkante) schneller abgeschlossen ist als in der Versuchsanordnung bei **Pkt. 4.1.5. Waagerechte Einformlage** und sich demnach kein so breit auslaufender „Schüttkegel“ ausbilden kann.

## 4.2. Untersuchungen zur Eigenfrequenz

Bei den mit Glaskugeln durchgeführten Vibrationsversuchen wurde im Frequenzbereich von 12 bis 13 Hz ein Resonanzgebiet entdeckt, die der Hoffnung, dass der Formstoff eine Eigenfrequenz besitzen könnte, neue Nahrung gibt. Denn, wenn es irgendwie gelänge, ausschließlich den Formstoff in Resonanzschwingungen zu versetzen, würde dies möglicher Weise bisher ungeahnte Varianten von Hohlraumbefüllungs- und Sandverdichtungsregimes ergeben. Der bei den Glaskugelversuchen beobachtete „Resonanzfall“ diene als Ansatz für die dem entsprechenden Sandversuche.

Zu Beginn der Resonanzuntersuchungen wurde die Eigenfrequenz des Tisches, ohne irgendwelche Aufbauten, mit 12 Hz ermittelt. Anschließend wurde der Behälter (vom 3-D-Tisch) fest aufgespannt und mit 20 kg Sandfüllung beginnend vibriert. Die Füllmenge wurde Schrittweise auf letztendlich eine (maximale) Masse von 90 kg erhöht. Mit der Erhöhung der Füllmenge nahm die Eigenfrequenz in kleinen Schritten ab, um bei der Maximalfüllung 10 Hz zu erreichen.

Damit wird, dem Formel mäßigen Zusammenhang entsprechend, der Einfluss der Masse eines schwingenden Systems bestätigt. Abgeleitet aus der Beziehung, die für den Resonanzfall bei erzwungenen harmonischen Schwingungen gilt: Erregerkreisfrequenz ist gleich Eigenkreisfrequenz ( $\Omega_E = \omega_0$ ), und  $\omega_0^2 = c / m$  (10) /61 – 63/, die den Zusammenhang zwischen der Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$ , der Federkonstanten  $c$  und der Masse  $m$  beschreibt, ergibt sich für die Resonanzfrequenz  $f_R = 1 / (2 * \pi) * (c / m)^{1/2}$  (11) /61 – 63/. Und diese Formel bekräftigt, dass eine Zunahme der schwingenden Masse bei unveränderter Federkonstanten zu einer Abnahme der Eigenfrequenz führt.

Beim Auftreten der Resonanzfrequenz wurde stets ein Schwingen des Gesamtsystems (Tisch–Behälter–Füllung) festgestellt, eine „Extra-Schwingung“ des Formsandes konnte nicht beobachtet werden. Der Behälter führte im oberen Bereich neben den vertikalen starke horizontale Schwingungen aus, obwohl die Erregung ausschließlich in vertikaler Richtung erfolgte. Außerhalb des Resonanzbereiches vibrierte das Gesamtsystem nur leicht und der Formsand verharrte an Ort und Stelle im Behälter.

Obwohl eine Resonanzfrequenz des Formstoffes nicht gefunden werden konnte, bedeutet das jedoch nicht, dass bei einer intensiveren und unter weiter zu spezifizierenden Versuchsbedingungen durchgeführte Suche nicht doch noch von Erfolg gekrönt sein könnte.

### **4.3. Betriebliche Untersuchungen**

#### **4.3.1. Aufgabenstellung**

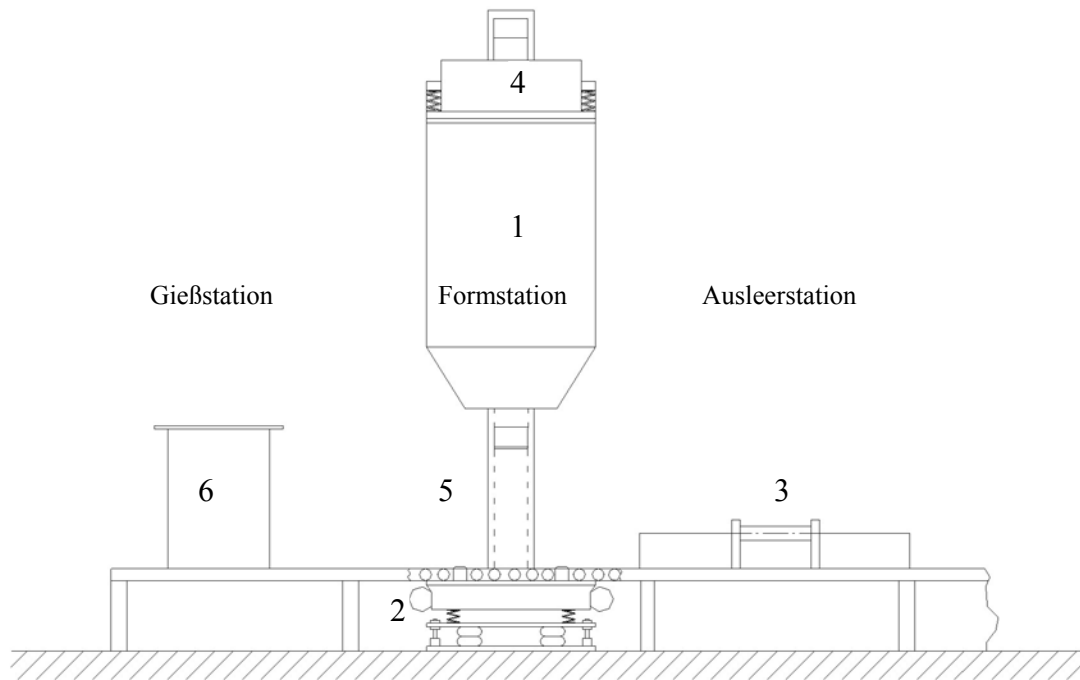
Für den Nachweis der Notwendigkeit der Verklammerung des Formstoffbehälters mit dem Vibrationstisch ist eine komplexe Untersuchung deren Beschleunigungsverhaltens und des sich daraus ergebenden Füll- und Verdichtungsverhaltens des Formstoffes erforderlich. Die zugehörigen Versuche wurden an einer in einem Unternehmen vorhandenen Versuchsanlage durchgeführt, auch mit der Maßgabe ein optimales Vibrationsregime zu finden, dass im Er-



gebnis den Verdichtungsprozess reproduzierbar gestaltet und somit Gussteile mit guter Qualität ermöglicht. Da hier eine Behälterverklammerung nicht vorhanden war, musste bei Beschleunigungen oberhalb von 1 g mit dem Abheben des Behälters vom Tisch gerechnet werden. Es stand somit die Aufgabe, mit den Beschleunigungsversuchen die Grenze zum Abheben in Abhängigkeit von der Behälterfüllung zu ermitteln, da damit gerechnet wurde, dass mit einer Erhöhung der Gewichtskraft des Behälters durch die eingefüllte Sandmasse die Tendenz zum Abheben zu höheren Beschleunigungen verschoben wird. Eine höhere Beschleunigung als 1 g ist aber lt. Literatur /11/ auch nötig, um den Formsand überhaupt in Bewegung zu versetzen, um die Hohlräume und Hinterschneidungen der abzugießenden Bauteile mit Formsand zu befüllen bzw. den Sand zu verdichten.

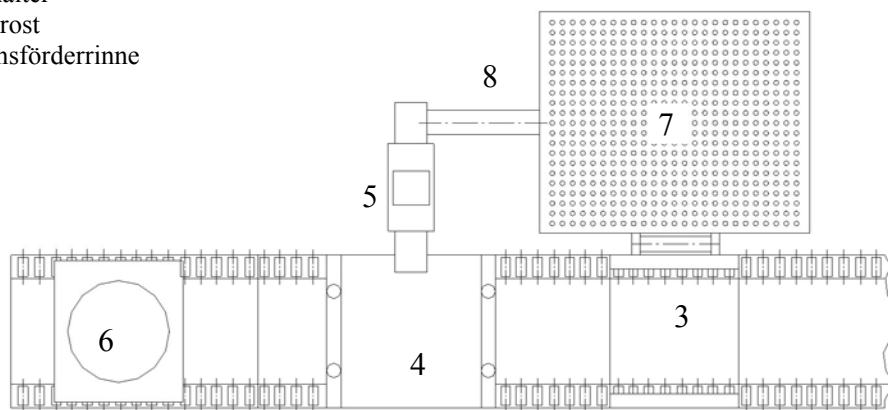
Wie lässt sich eine eventuell notwendige Verklammerung des Behälters konstruktiv umsetzen?

#### 4.3.2. Beschreibung der vorhandenen Versuchsanlage



##### Legende

- 1 Bunker
- 2 Vibrationstisch
- 3 Kippeinrichtung
- 4 Schwingsieb
- 5 Becherwerk
- 6 Formbehälter
- 7 Auspackrost
- 8 Vibrationsförderrinne

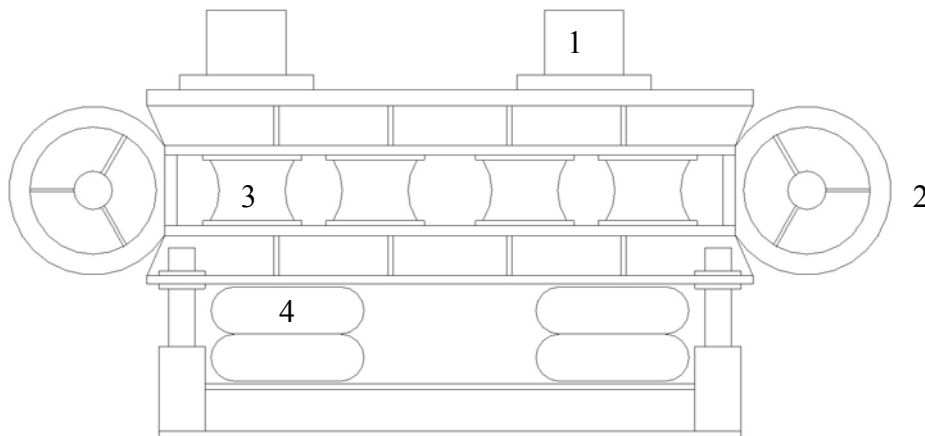


**Bild 35: Schematische Darstellung der Anlage (oben: Seitenansicht, unten: Draufsicht)**

Der Aufbau der Anlage ist im **Bild 35** schematisch dargestellt, dabei nimmt die Formstation die zentrale Stellung zwischen der Gießstation und der Ausleerstation ein, sie enthält den Bunker für den Quarzsand, den Vibrationstisch und den Formbehälter; hier findet der Einfüll- und Verdichtungsprozess statt. Der Bunker mit einem Fassungsvermögen von ca. 6 m<sup>3</sup> ist direkt über dem Vibrationstisch befestigt. Der Bunkerabzug besteht aus zwei übereinander an-

gebrachten Lochplatten, die mittels Hydraulik gegeneinander verschoben werden können. Befinden sich die Löcher beider Platten genau übereinander, ist der Bunker in der (Voll)“Geöffnet“-Funktion und der Quarzsand fließt (mit max. Geschwindigkeit) aus dem Bunker in den Formbehälter. Wenn jedoch die Öffnungen einander (völlig) verdecken, ist der Bunker geschlossen und der Quarzsand verbleibt im Bunker. Durch eine Begrenzung des Öffnungsweges der beweglichen Platte kann auf die Einfüllgeschwindigkeit des Sandes Einfluss genommen werden. Eine Absaugeinrichtung entfernt die beim Befüllen des Formbehälters aufgewirbelten Feinkornanteile des Sandes (Staub).

Der Formbehälter mit einer Leermasse von ca. 600 kg wird auf einer Rollenbahn von Hand über den Vibrationstisch geschoben. Eine Markierung zur Positionierung des Formbehälters ist vorhanden, damit die Auflagepunkte des Vibrationstisches in die Gegenstücke des Behälters einrasten. Der Formbehälter liegt auf den Auflagepunkten auf, ist aber mit dem Tisch (**Bild 36**) nicht verklammert. Über vier Luftkissen wird der Tisch so weit angehoben, dass der Formbehälter von der Rollenbahn abhebt. Der Vibrationstisch liegt nach dem Anheben auf acht Schwingungsisolatoren und wird über zwei Vibratoren (Wellenunwuchtantriebe) in Schwingungen versetzt.



**Bild 36: Skizze des Vibrationstisches (1 Auflagepunkt des Formbehälters, 2 Vibrator, 3 Gummifeder, 4 Luftkissen)**

Nach dem Einfüllen des Styropor-Modells im Quarzsand wird der gefüllte Formbehälter zur Gießstation geschoben. Zur Herstellung der Schmelze stehen Induktionstiegelöfen zur Verfügung, die neben der Vollformgießanlage stehen. Das Schmelzgut wird in einer Gießpfanne unter Nutzung eines Deckenkranes zur Gießstation transportiert. Über der Gießstation ist eine Absaugung der Gießgase angebracht.

Nach dem Abguss wird der Behälter zur Ausleerstation geschoben. Durch das Kippen des vollen Formbehälters über seine waagerechte Lage hinaus, kann dessen Inhalt auf das Auspackrost entleert werden. Der Quarzsand und andere Feinanteile fallen durch das Rost (Lochblech) und das Rohgussteil bzw. Gieß- und Speisesystem bleiben darauf liegen. Der Sand wird anschließend gesichtet und dem Formstoffkreislauf wieder zugeführt. Die Kippeinrichtung befindet sich vor dem Auspackrost und wird über einen Hydraulikzylinder bewegt. Während des Kippvorganges ist der Formbehälter nicht verklammert, er wird nur durch zwei Halterungen gehalten.

### 4.3.3. Versuchsdurchführung

Bei der Untersuchung des Vibrationstisches durch Vibrationsmessungen wurden folgende Größen variiert:

- Masse (Formbehältermasse, Sandmasse)
- Drehzahl der Vibratoren → Erregerfrequenz
- Winkelverschiebung der Unwuchtscheiben → Amplitude → Erregerkraft

#### 4.3.3.1. Einflussgrößen

##### – *Masse*

Der Formbehälter hat einen Innendurchmesser von  $D_{FB} = 81 \text{ cm}$  und eine Höhe von  $H_{FB} = 96 \text{ cm}$ . Die Masse des Behälters beträgt im leeren Zustand  $m_{FB} \approx 600 \text{ kg}$ . Die Beschleunigungsmessungen wurden ohne Formbehälter und mit Formbehälter durchgeführt. Bei den Messungen mit Formbehälter wurde die Füllhöhe des Sandes von 0 bis 96 cm variiert. Mit einer Schüttdichte des Quarzsandes von  $\rho_s = 1,55 \text{ g/cm}^3$  bei Füllhöhen von 24 cm, 48 cm und 96 cm, ergibt sich die Masse des Quarzsandes nach folgender Formel:

$$m_s = \rho_s \cdot V = \rho_s \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{FB}^2 \cdot H_F. \quad (12)$$

$\rho_s$  – Schüttdichte des Quarzsandes

$D_{FB}$  – Innendurchmesser des Formbehälters

$H_F$  – Füllhöhe des Quarzsandes

Die Gesamtmasse  $m_{ges}$  ergibt sich aus der Masse des Quarzsandes  $m_s$  und der Masse des

Formbehälters  $m_{FB}$ :

$$m_{ges} = m_S + m_{FB} \quad (13)$$

In **Tabelle 3** wird die berechnete Masse des Quarzsandes  $m_S$ , die Masse des Formbehälters  $m_{FB}$  und die Gesamtmasse  $m_{ges}$ , mit der der Vibrationstisch belastet wird, bei variierender Füllhöhe des Quarzsandes  $H_F$  dargestellt.

|                                       | Füllhöhe des Quarzsandes $H_F$ [cm] |     |     |      |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-----|-----|------|
|                                       | 0                                   | 24  | 48  | 96   |
| Masse des Quarzsandes $m_S$ [kg]      | 0                                   | 190 | 380 | 760  |
| Masse des Formbehälters $m_{FB}$ [kg] | 600                                 | 600 | 600 | 600  |
| Gesamtmasse $m_{ges}$ [kg]            | 600                                 | 790 | 980 | 1360 |

**Tabelle 3: Gesamtmasse bei variierender Füllhöhe des Quarzsandes**

#### – Drehzahl der Vibratoren

Wie bereits unter **Pkt. 4.3.2. Beschreibung der vorhandenen Versuchsanlage** angedeutet, erfolgt die Beschleunigung des Tisches unter Nutzung von mit einer Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  rotierenden Unwuchten. Die Bewegungsgleichung für derartig Unwucht erregte Beschleunigungen lautet wie folgt:

$$m_{ges} \cdot w'' + d \cdot w' + c \cdot w = m_u \cdot e \cdot \Omega^2 \cdot \cos \Omega t \quad /62/ \quad (14)$$

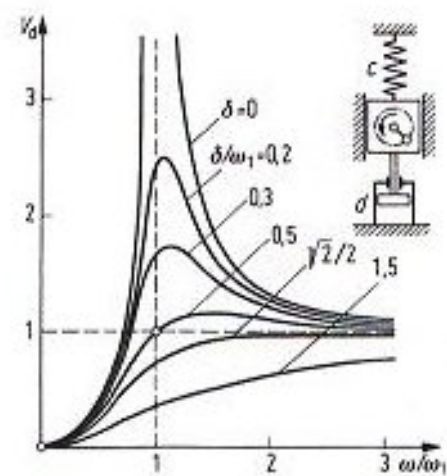
Dabei sind:

- $m_{ges}$  Summe aller bewegter Massen (inklusive: Tisch, Behälter, Sand)
- $d$  Gesamtdämpfungszahl
- $c$  Gesamtfederzahl
- $w$  (vertikale) Auslenkung des Systems gegenüber der statischen Ruhelage
- $m_u$  Masse der rotierenden Unwucht
- $e$  Exzentrizität
- $\Omega$  Winkelgeschwindigkeit, die sich aus  $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{err}$  berechnet ( $f_{err}$  Erregerfrequenz)

Bei der Tischbeschleunigung ist es wichtig, dass die eingeleiteten Schwingungen nicht „außer Kontrolle“ geraten, d. h., die gewählten Erregerfrequenzen außerhalb des Resonanzbereiches des schwingenden Systems liegen. Wie unter **Pkt. 4.2. Untersuchungen zur Eigenfrequenz** beschrieben, ist im Resonanzfall das Verhältnis der gewählten Federkonstante zur bewegten Masse ( $f_R = 1 / (2 \cdot \pi) \cdot (c / m)^{1/2}$ ) einen entscheidenden Einfluss, weshalb diese Federkonstanten

üblicherweise auf die zu beschleunigenden Massen abgestimmt werden. Das Ergebnis der Abstimmung bestand hier darin, dass letzt endlich die Resonanzfrequenz des Tisches (ohne Behälter) bei 12,5 Hz, d. h., 750 U/min lag. In Folge dessen gab es die betriebliche Anweisung, den Drehzahlbereich unterhalb von 800 U/min bei Handregelung möglichst schnell zu durchfahren und ansonsten keine Drehzahlen in diesem unteren Bereich anzusteuern (**verboten!**). Bei der Hinzunahme des Behälters und insbesondere durch dessen Befüllung wird die schwingende Gesamtmasse erhöht, was zu einer weiter abnehmenden Eigenfrequenz führt und damit die überkritische Fahrweise der Vibrationsanlage sicher stellt. Kritisch ist der (unerwünschte) Resonanzfall mit seiner Beziehung: Erregerkreisfrequenz = Eigenkreisfrequenz oder anders ausgedrückt  $\eta = \Omega_E / \omega_0 = 1$  bzw.  $\omega / \omega_1$

= 1 (**Bild 37**) /63/, dargestellt hier im Diagramm mit der Vergrößerungsfunktion  $V_d$  als Funktion des Frequenzverhältnisses und des Dämpfungsgrades, abgeleitet aus der Beziehung  $V_d = \eta^2 / [(1 - \eta^2)^2 + (2 * \delta * \eta)^2]^{1/2}$ . Wenn  $\eta > 1$  ist, bedeutet das, dass die Erregerfrequenz größer als die (kritische) Eigenfrequenz ist, d. h., es wird überkritisch erregt. Eine unterkritische Erregung mit der Beziehung  $\eta < 1$  bedeutet, dass mit einer Frequenz unterhalb der Resonanzfrequenz vibriert wird. Eine solche „Fahrweise“ würde bedeuten, dass eine Masseerhöhung in Folge der Hinzunahme des Behälters und dessen Befüllung die akute Gefahr in sich birgt, in den Resonanzbereich zu geraten, weil ja mit der zunehmenden Masse die Eigenfrequenz herabgesetzt wird. Das ist ein schwer zu kalkulierendes Risiko, das mit der überkritischen Fahrweise vermieden werden kann.



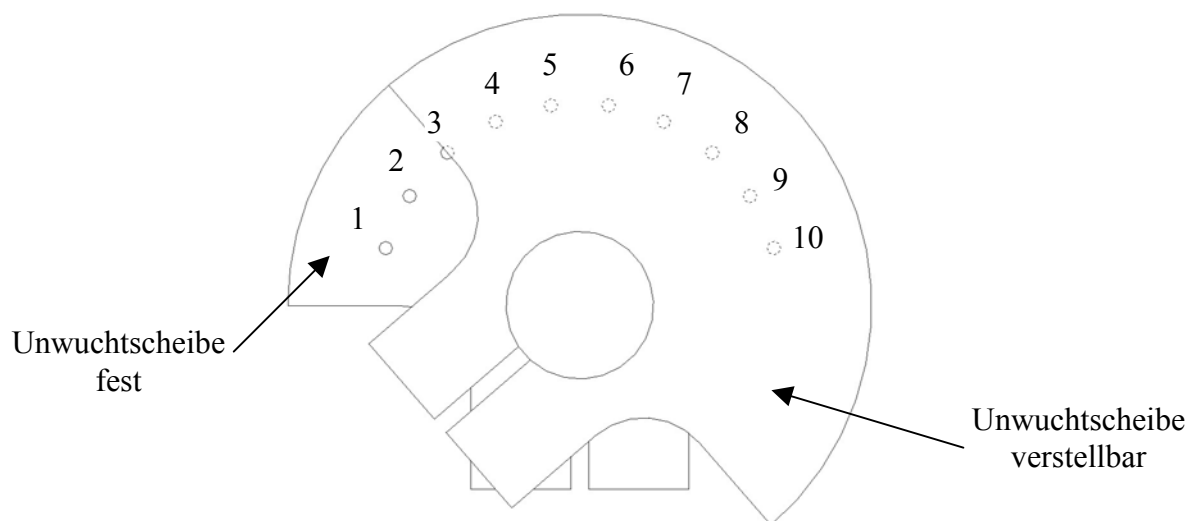
**Bild 37: Vergrößerungsfaktor bei dynamischer Erregung /63/**

Die Einstellung der Drehzahl der Vibratoren am Vibrationstisch erfolgt mittels eines Potentiometers, das mit einem Handrad am Schaltschrank der Anlage betätigt wird. Eine digitale Anzeige dient zur Kontrolle des so eingestellten Wertes.

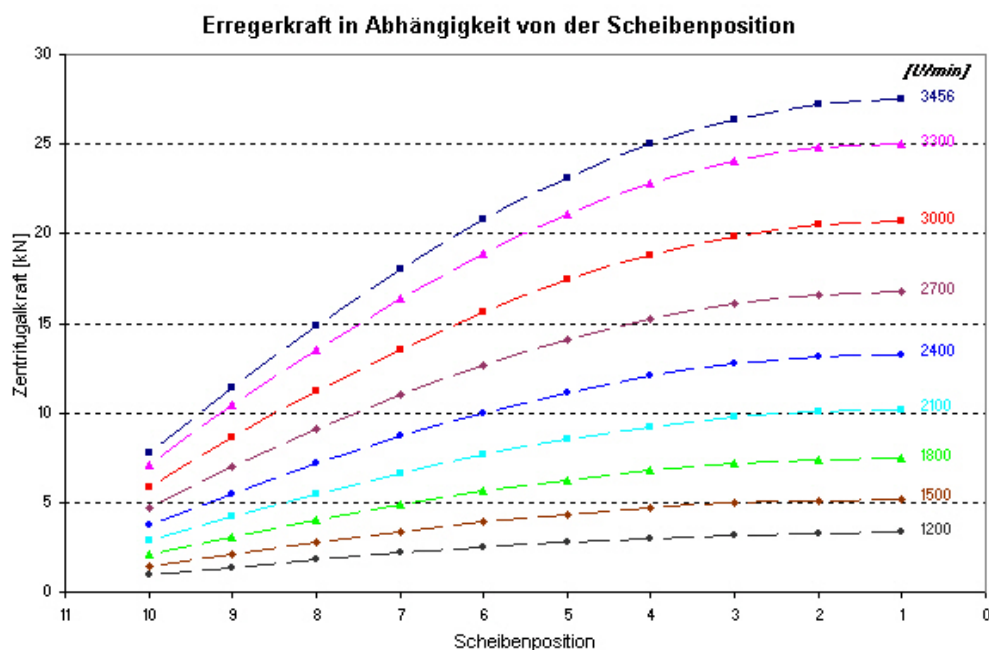
Die Drehzahlen der Vibratoren wurden in 20er bzw. 50er U/min-Schritten in einem Bereich von 800 bis (max.) 3540 U/min variiert.

### – Winkelverschiebung der Unwuchtscheiben

Wie unter **Pkt. 4.2.2.** bereits beschrieben, hat jeder Vibrator vier Unwuchtscheiben, zwei auf jeder Seite. Eine Scheibe ist fest, die andere verstellbar gelagert. Mit dem Verstellen der Unwuchtscheibe ändert sich die resultierende Erregerkraft. Das Verstellen der Unwuchtscheibe kann in 10 Positionen erfolgen (**Bild 38**). Die Position 1 bedeutet, dass beide Scheiben deckungsgleich übereinander liegen und die resultierende Erregerkraft am höchsten ist. Position 10 bedeutet, dass die Unwuchtscheiben fast um  $150^\circ$  zueinander verdreht sind und hier die resultierende Erregerkraft (**Bild 39**) am geringsten ist.

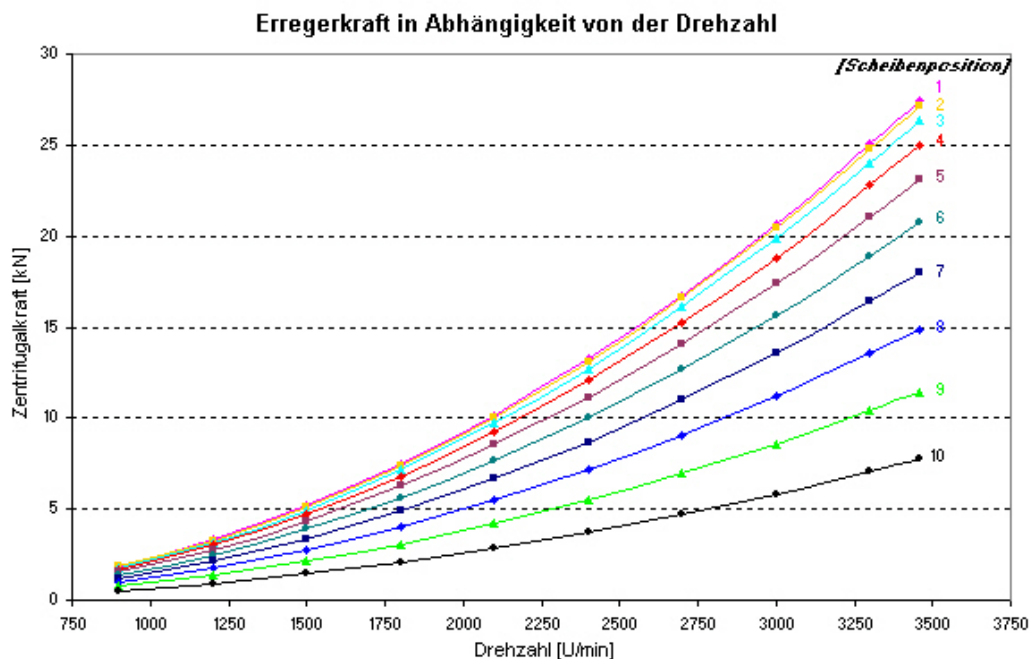


**Bild 38: Unwuchtscheibe mit Positionsnummern**



**Bild 39: einstellbare Erregerkräfte**

Im **Bild 39** ist der Zusammenhang zwischen den Scheibenpositionen und den zugehörigen Erregerkräften dargestellt, dabei wird in der Position 1 mit der maximalen Drehzahl von 3456 U/min die Maximalkraft von 27,5 kN erreicht. Der mathematische Zusammenhang zwischen den im Diagramm verwendeten Größen erschließt sich aus dem „Kraftteil“ der Gleichung (14):  $F_u = m_u \cdot e \cdot \Omega^2 \cdot \cos \Omega t$ , dabei ergibt sich die (maximale) Erregerkraft, die gleichzeitig der wirkenden Zentrifugalkraft entspricht, wenn der Faktor  $\cos \Omega t$  den Wert „1“ annimmt, d. h.,  $F_{err} = F_z = m_u \cdot e \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_{err})^2$ . Durch die Veränderung der Position der verstellbaren Scheibe kommt es zu einer Verschiebung des Masseschwerpunktes des Scheibenpaares, der Schwerpunkt verlagert sich in die Winkelhalbierende der Schwerpunkte der beiden Teilmassen und die Exzentrizität verändert sich nach der Beziehung  $e_n = e_0 \cdot \cos \alpha/2$ . Diese Kosinusbeziehung verursacht den gekrümmten Verlauf der Kurven und belegt eine nur geringe Abnahme der Erregerkraft bis zur Scheibenposition 4 bezogen auf die „Ausgangsposition“ 1. Die Unterschiede in den Erregerkräften werden erst mit der Position 5 beginnend in Richtung Scheibenposition 10 größer, wie auch das **Bild 40** mit der dargestellten Abhängigkeit der Erregerkraft von der Drehzahl eindrucksvoll belegt.



**Bild 40: Erregerkraft in Abhängigkeit von der Drehzahl**

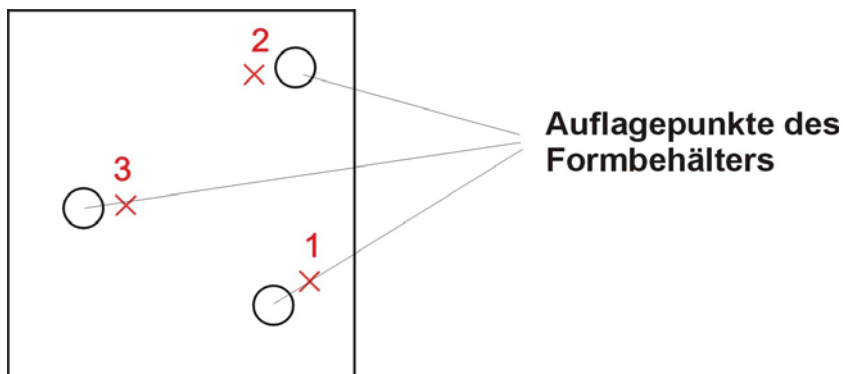


#### 4.3.3.2. Beschleunigungsmessungen

##### – Positionierung der Beschleunigungsaufnehmer

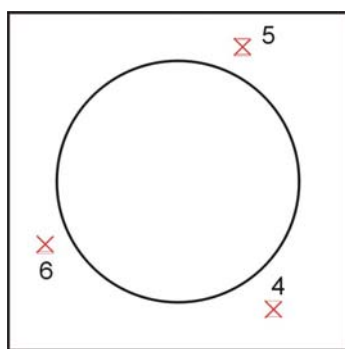
Zur Messung der Beschleunigung am Vibrationstisch und am Formbehälter werden jeweils 3 Beschleunigungssensoren verwendet.

Am Vibrationstisch wurden 3 Bohrungen mit M3–Gewinde nahe der Auflagepunkte des Formbehälters angebracht (**Bild 41**). In diese Gewindebohrungen wurden die Beschleunigungsaufnehmer senkrecht zur Tischoberfläche eingeschraubt. Damit werden die vertikalen Beschleunigungen des Vibrationstisches an drei unterschiedlichen Punkten erfasst.



**Bild 41: Position der Beschleunigungsaufnehmer am Vibrationstisch (Draufsicht)**

Für die Erfassung der vertikalen Beschleunigungen des Formbehälters wurden die Sensoren in ähnlicher Weise am Fuße des Behälters angeordnet. Die Position und die Nummerierung der Beschleunigungsaufnehmer am Formbehälter zeigt **Bild 42**.

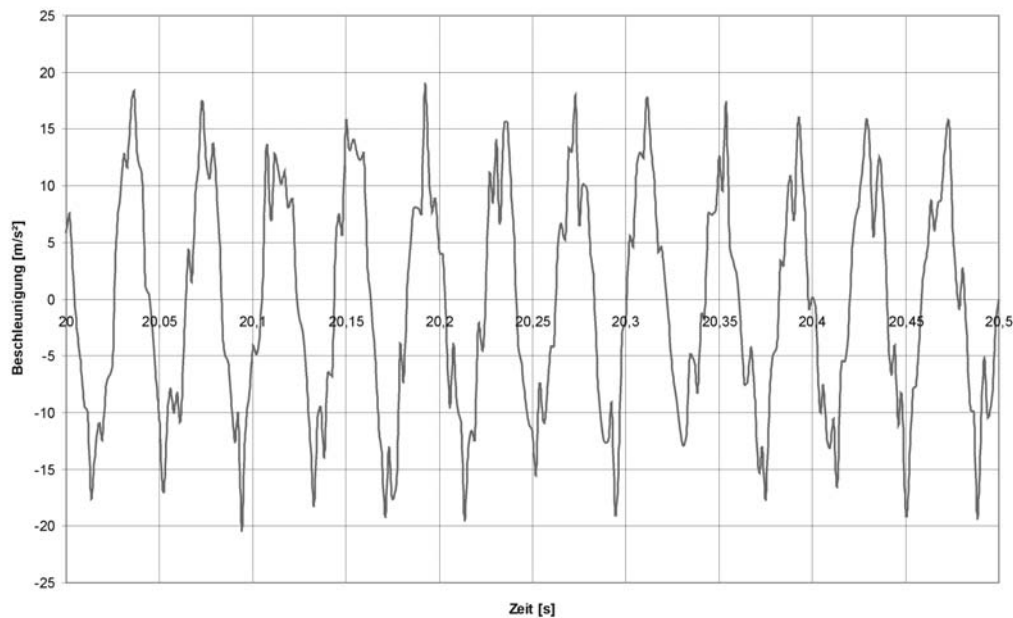


**Bild 42: Position der Beschleunigungsaufnehmer am Formbehälter (Draufsicht)**

Die Vibrations- und Verdichtungsmessungen erfolgten mit halb vollem, drei Viertel vollem und vollem Behälter. Die Stufe ein Viertel voll wurde hier nicht in die Untersuchungen einbezogen, da in der Praxis i. a. ca. 20 cm als so genannte Grund- oder Bettschicht eingefüllt werden und diese Zone deshalb für den eigentlichen Einfüll- und Verdichtungsprozess keine Bedeutung besitzt.

### – Überprüfung der Drehzahlanzeige

Vor der Durchführung der eigentlichen Messungen wurde die Genauigkeit der Drehzahlanzeige mit der am Tisch gemessenen Drehzahl, durch Auszählen der Schwingungen pro Sekunde und Multiplikation mit 60, verglichen.



**Bild 43: Vibrationskurve des Tisches bei 1500 U/min**

Die durchgeführte Überprüfung der Drehzahl ist am Beispiel im Diagramm (**Bild 43**) dargestellt und zeigt einen Ausschnitt aus einer Messung bei einer eingestellten Drehzahl von 1500 U/min. In dem Diagramm ist die Beschleunigung des Vibrationstisches über der Zeit aufgetragen. Für 10 volle Schwingungen werden 0,4 Sekunden (von 20,0 s bis 20,4 s) benötigt, daraus ergibt sich eine Frequenz von 25 Hz, die einer Drehzahl von 1500 U/min entspricht. Damit stimmt die gemessene mit der angezeigten Drehzahl überein, die Übereinstimmung wurde bei weiteren Drehzahl-Überprüfungen bestätigt.

### – Messungen ohne Formbehälter

#### *Erläuterungen:*

Zunächst wurde mit der ursprünglichen Einstellung der Unwuchtviбрatoren, Scheiben auf der Position 3 (**Bild 38**), begonnen, die Beschleunigungsmessungen durchzuführen. Die Sensoren wurden dazu, wie im **Bild 41** skizziert, am Vibrationstisch angebracht. Die Drehzahl der Vibratoren wurde von 850 U/min bis 2500 U/min in 50er Schritten erhöht, als Vibrationsdauer wurden jeweils für eine Messung 40 s festgelegt.

Jede Messung wurde zweimal wiederholt und die anderen Positionen der Unwuchtscheiben (1, 2 und 4 bis 10) wurden nach Abschluss der Messungen bei Position 3 auch auf gleiche Weise untersucht. Ab der Position 5 wird jedoch nur noch ein Beschleunigungsaufnehmer (Sensor 2) am Vibrationstisch eingesetzt, weil die Beschleunigungskurven der drei Sensoren nahezu identische Verläufe zeigten.

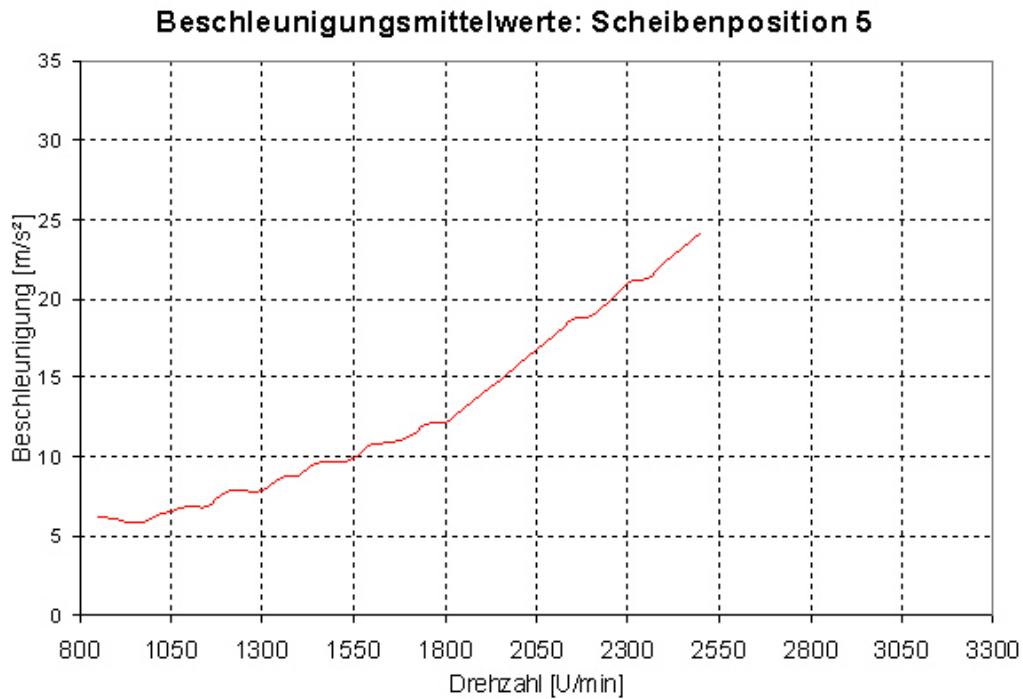
### *Auswertung und Ergebnis*

Die Vibrationskurven des Tisches zeigen einen unruhigen, unharmonischen Verlauf, wie auch in dem **Bild 40** zu erkennen ist. Die Ursache für diese Erscheinungen, die im Fachjargon „Schläge“ genannt werden, konnte nicht ermittelt werden. Deshalb erfolgte die Auswertung der Vibrationskurven mit einem Programm zur Bestimmung des Mittelwertes (mittlere Beschleunigung) zwischen einer oberen und einer unteren Grenze. Es wurde jeweils der Mittelwert über einen Zeitraum von 15 s bestimmt, festgelegt immer zwischen 10 und 25 s einer jeden Messung. Daraus wurde für jede Messung ein Mittelwert der Beschleunigung in  $\text{m/s}^2$  errechnet, die Werte wurden in einem Diagramm über der Vibratordrehzahl dargestellt.

Bei den Messungen mit 3 Beschleunigungsaufnehmern wurde festgestellt, dass die Beschleunigungen an den 3 verschiedenen Punkten des Tisches nahezu übereinstimmen. Der Vibrationstisch bewegt sich also gleichmäßig in vertikaler Richtung. Mit der Reduzierung auf nur einen Beschleunigungsaufnehmer konnte die Abtastrate auf 1381 Hz, d. h. 1381 Ablesevorgänge pro Sekunde, erhöht werden; jedoch blieb eine damit erhoffte, deutliche Verbesserung der Beschleunigungskurvenverläufe („Schläge“) aus.

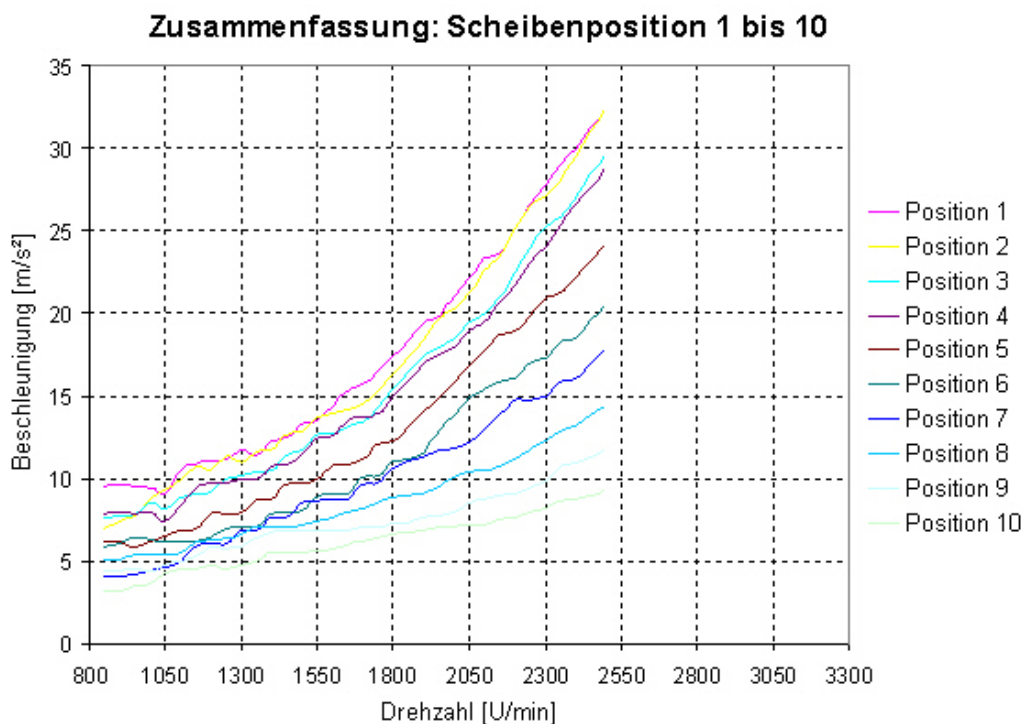
Als Beispiel für die Messergebnisse mit nur einem Beschleunigungsaufnehmer (Sensor 2) ist der Kurvenverlauf mit der Scheibenposition 5 im **Bild 44** dargestellt. Es ist ein Stufenförmiger Anstieg der Kurve zu erkennen, der eher auf die Art und Weise der Auswertung als auf verfahrensbedingte Ursachen zurückzuführen ist. Deshalb werden zur Darstellung der im **Bild 45** zusammengefassten Beschleunigungskurven des Vibrationstisches in Abhängigkeit von der Drehzahl Trendlinien verwendet.

An Hand dieser Kurvenverläufe kann die durch das Verstellen der Unwuchtscheiben bewirkte Veränderung der Tischbeschleunigung nachgewiesen werden. Sind die Scheiben entsprechend der Position 1 deckungsgleich (**Bild 38**), ergibt sich zwischen 850 U/min und 1100 U/min ein Wert von ca. 1 g. Mit der Schrittweisen Erhöhung der Vibratordrehzahl auf letztendlich 2500 U/min erreicht die Beschleunigung ihren Höchstwert mit 3,3 g.



**Bild 44: Beispieldiagramm – Beschleunigung in Abhängigkeit von der Drehzahl**

Wie der Vergleich mit dem **Bild 40** zeigt, entsprechen die dargestellten Beschleunigungskurvenverläufe den Verläufen der Erregerkräfte in Abhängigkeit von der Drehzahl, womit der direkte Bezug der Erregerkraft auf die erzielbare Beschleunigung bei den Unwucht erregten Vibrationen nachgewiesen ist. Das die Beschleunigungswerte in dem Bereich von 850 bis



**Bild 45: Abhängigkeit der Beschleunigung von der Drehzahl in Trendliniendarstellung**

1050 U/min zum großen Teil stagnieren bzw. teilweise auch rückläufige Tendenzen aufweisen, wird auf die „Ausstrahlung“ des Resonanzbereiches zurückgeführt. Denn, wie im **Bild 37** ersichtlich, im Grenzbereich zur Eigenkreisfrequenz klingen die Resonanzerscheinungen erst mit zunehmenden Abstand, auch abhängig von der Stärke der vorhandenen Dämpfung, allmählich ab. Das hat zur Folge, dass die steigende Drehzahl der Beschleunigung eine Tendenz zur Abnahme erteilt und der durch die zunehmende Erregerkraft indizierten Zunahme entgegenwirkt.

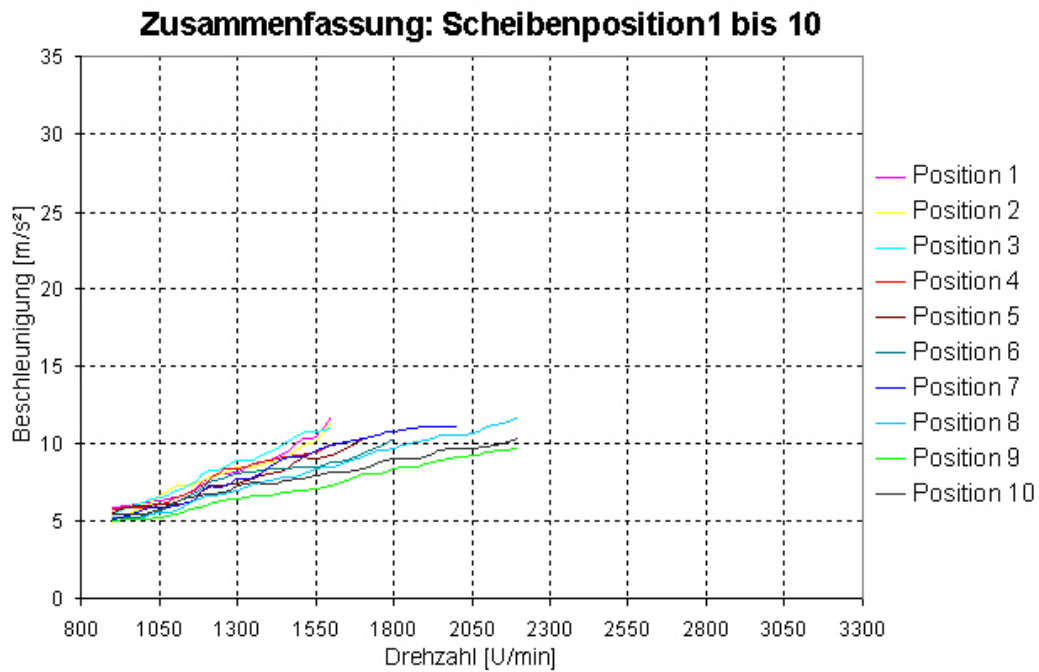
Der Anstieg der Trendlinie bei der Position 1 ist, auf Grund der maximalen Erregerkraft, erwartungsgemäß am steilsten. Die Vergrößerung des Winkels zwischen fester und beweglicher Unwuchtscheibe verringert die Erregerkraft (**Bild 39**), der Anstieg wird flacher und die bei gleicher Drehzahl erzielbaren Beschleunigungswerte nehmen ab (**Bild 45**). Dabei verschiebt sich der Punkt, an dem eine Beschleunigung von 1 g erreicht wird, immer weiter in Richtung höherer Drehzahlen.

#### **– Messungen mit Formbehälter und Ergebnisse**

##### *leerer Formbehälter*

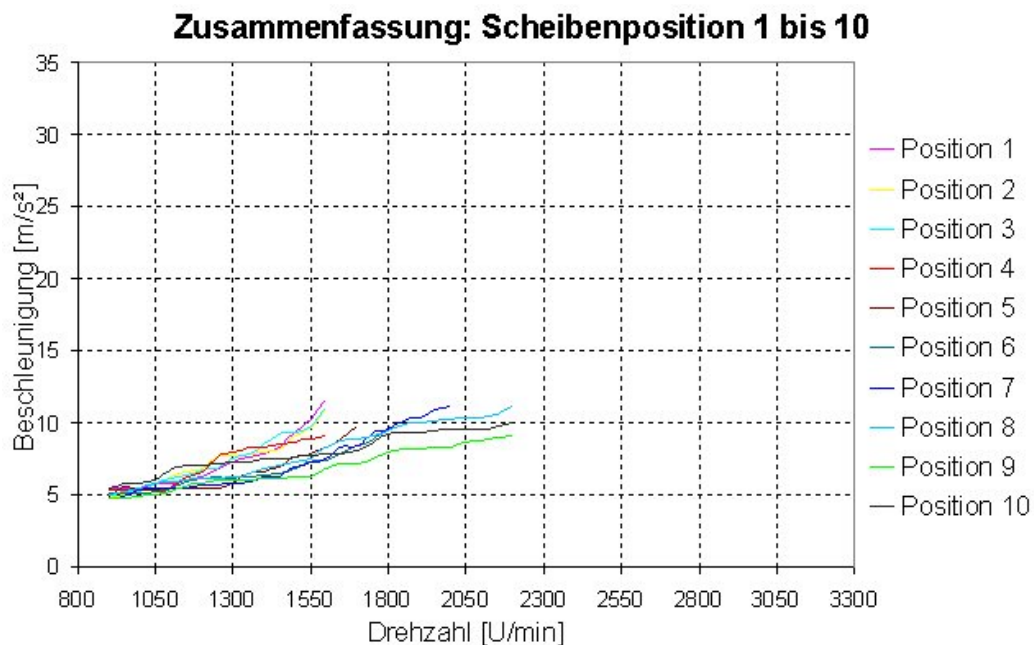
Die Untersuchung des Vibrationstisches mit leerem Formbehälter erfolgte nach dem gleichen Versuchsschema wie die Beschleunigungsmessungen am Behälter losen Tisch. Die Beschleunigungen des Tisches und des Formbehälters wurde bei den bekannten Drehzahlen und möglichen Scheibenpositionen gemessen. Bei der ersten Versuchsserie (Position 1) kamen noch 3 Aufnehmer zum Einsatz, die gemäß Skizze (**Bild 42**) am Formbehälter angebracht wurden. Die Auswertung der Serie erbrachte, dass der Formbehälter analog wie der Tisch an diesen 3 Punkten nahezu identische Beschleunigungskurvenverläufe aufweist. Deshalb wurde für die weiteren Versuche am Formbehälter nur 1 Beschleunigungsaufnehmer eingesetzt. Ein zweiter Sensor, am Vibrationstisch angebracht, diente zum Vergleich zwischen Tisch und Behälter.

Die in den Diagrammen zusammengefassten Beschleunigungskurven des Vibrationstisches (**Bild 46**) und des Formbehälters (**Bild 47**) zeigen das zu erwartende Verhalten, mit Erhöhung der Drehzahl der Vibratoren steigen die Beschleunigungswerte an. Allgemein sind die Werte des Tisches geringfügig höher als die des Behälters, insbesondere in den unteren Drehzahlbereichen. In den mittleren und oberen Bereichen sind zum Teil die Unterschiede geringer, augenfällig ist in der Position 9, dass die Beschleunigungen des Tisches (**Bild 46**) immer und die des Behälters (**Bild 47**) meistens die niedrigsten Werte erreichten. Zurückgeführt wird das auf den Einfluss des Behälters mit seiner Masse von 600 kg, denn diese Behältermasse muss zu-



**Bild 46: Tischbeschleunigung in Abhängigkeit von der Drehzahl mit leerem Behälter**

sätzlich zur Tischmasse mit der gleichen Erregerkraft bewegt werden. Diese Masseerhöhung führt auch zu einer Herabsetzung der Eigenfrequenz ( $f_R = 1 / (2 * \pi) * (c / m)^{1/2}$ ) und der damit in Verbindung gebrachten (gedämpften) Resonanzerscheinungen.



**Bild 47: Beschleunigung des leeren Behälters in Abhängigkeit von der Drehzahl**

Ebenfalls auf den Einfluss der Behältermasse ist die Verschiebung der Überschreitung der 1-g-Marke in Richtung höherer Drehzahlen zurückzuführen. Zum Beispiel wird bei der Position

4 und einer Drehzahl von ca. 1480 U/min eine Tischbeschleunigung von 1 g erreicht. Im Vergleich dazu wurde bei den Beschleunigungsmessungen ohne Formbehälter 1 g bereits bei ca. 1270 U/min erreicht.

Dass die Kurven zum Teil schon knapp unterhalb, spätestens jedoch nach Überschreiten der 1-g-Marke abbrechen, ist in der fehlenden Verklammerung des Behälters mit dem Tisch begründet. D. h., der Behälter wird auf dem Tisch nur auf Grund seiner Masse im Zusammenspiel mit seinen Auflagepunkten (**Bild 41**) in Position gehalten und beginnt mit der Annäherung der Beschleunigungen in den 1-g-Bereich zu „hüpfen“ und „springen“, so dass hier eine zweifelsfreie Auswertung der aufgenommenen Beschleunigungskurven unmöglich ist.

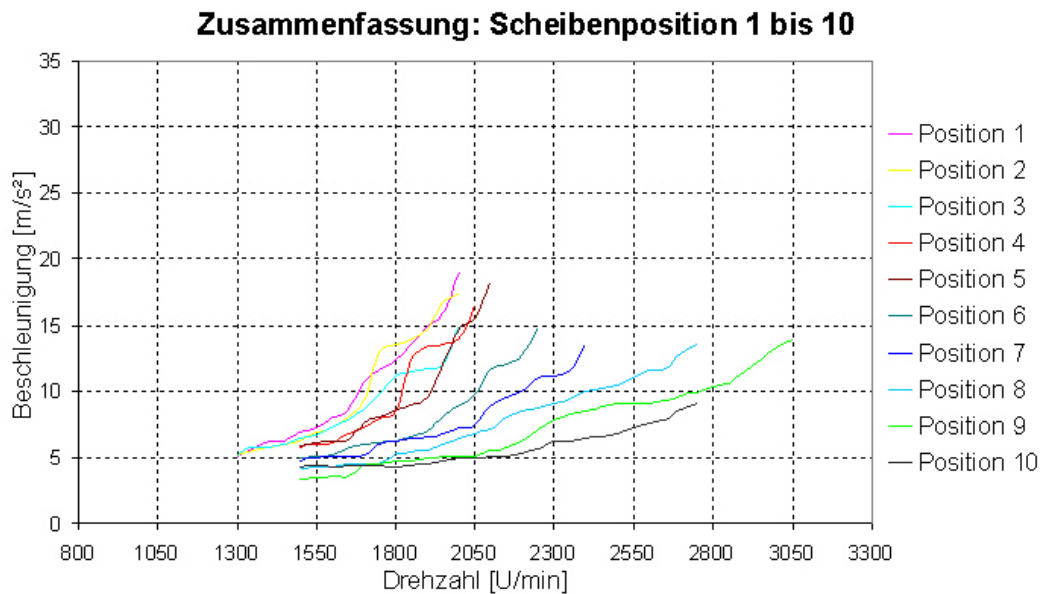
#### *halb voller Formbehälter*

Zur Vibrationsmessung wurden ebenfalls wieder je ein Beschleunigungsaufnehmer am Formbehälter und einer am Vibrationstisch befestigt. Die Versuchsdurchführung erfolgte wiederum zu den vergleichbaren Bedingungen der Schrittweisen Erhöhung der Vibratordrehzahl und der von 1 bis 10 variierende Einstellung der Scheibenpositionen. Die Messdauer von 40 s und der Auswertintervall für die Mittelwertbildung, von 10 bis 25 s der positiven Ausschläge der Vibrationskurven, wurden beibehalten.

Die errechneten Mittelwerte sind in dem Beschleunigungsdiagramm des Behälters (**Bild 48**) dargestellt, die Kurven des Tisches zeigten ähnliche Verläufe, so dass auf deren Darstellung hier verzichtet wird.

Das Diagramm bestätigt die bereits bei leerem Behälter gemachte Beobachtung, dass mit zunehmender Masse das Erreichen der 1-g-Marke zu immer höheren Drehzahlen verschoben wird. So wurde zum Beispiel bei der Position 1 dieser Wert bei einer Drehzahl von ca. 1680 U/min erreicht, während mit leerem Behälter dafür bereits ca. 1530 U/min ausreichten. Mit abnehmender Erregerkraft verlaufen die Kurven flacher, auftretende Unstetigkeiten (Sprünge), die bei hoher Kraft im Bereich um 1 g beobachtet wurden, verschoben es nach höheren Werten und geringeren Intensitäten. Die Sprunghaften Beschleunigungszunahmen sind dem oberhalb von 1 g beginnenden Abheben des Behälters geschuldet, da dieser bei den Versuchen nicht verklammert war.

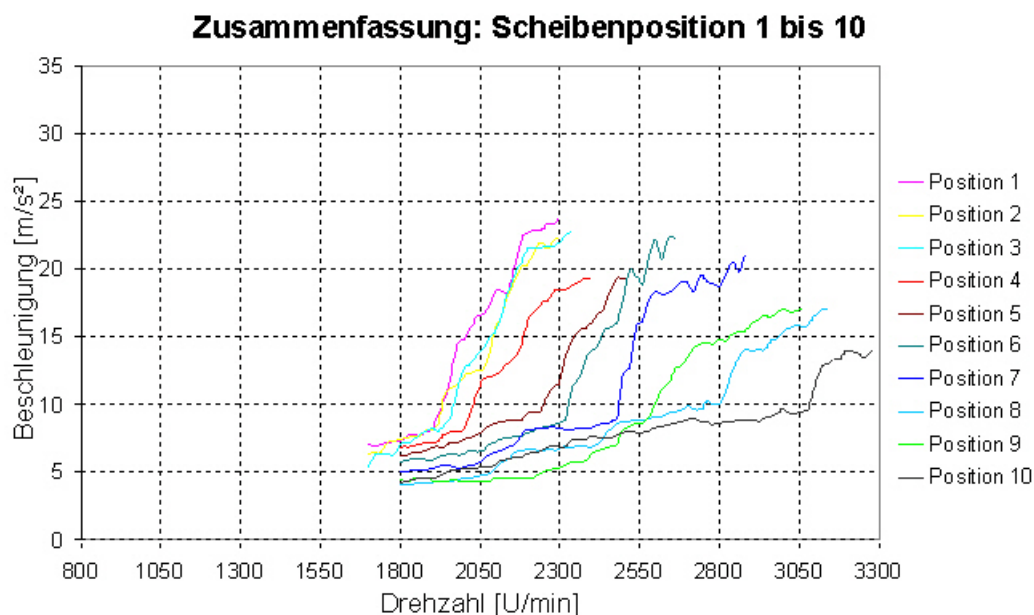
Der flachere Kurvenverlauf führte auch dazu, dass der bisher betrachtete Drehzahlbereich nicht ausreichte, insbesondere bei den letzten 3 Positionen, um die Beschleunigungen von mindestens 1 g zu erreichen.



**Bild 48: Beschleunigung des halb vollen Behälters in Abhängigkeit von der Drehzahl**

*voller Formbehälter*

Die Versuchsdurchführung und –auswertung erfolgte hier nach dem gleichen Schema wie bei den vorangegangenen Versuchen. Die Zusammenfassung der Beschleunigungskurvenverläufe des vollen Behälters wird im Diagramm (**Bild 49**) dargestellt.



**Bild 49: Beschleunigung des vollen Behälters in Abhängigkeit von der Drehzahl**

Es ist zu erkennen, dass bei vollem Formbehälter unterhalb 1 g eine Erhöhung der Drehzahl keinen oder nur einen geringen Anstieg der Beschleunigung des Behälters bewirkte. In unmittelbarem 1–g-Bereich erfolgte dann eine mehr oder weniger starke, sprunghafte Beschleuni-



gungszunahme, die in der Position 7 besonders stark ausfiel. Dabei wurden während der Messungen in dem 2-g-Bereich starke, z. T. heftige, sprunghafte Bewegungen des Formbehälters beobachtet.

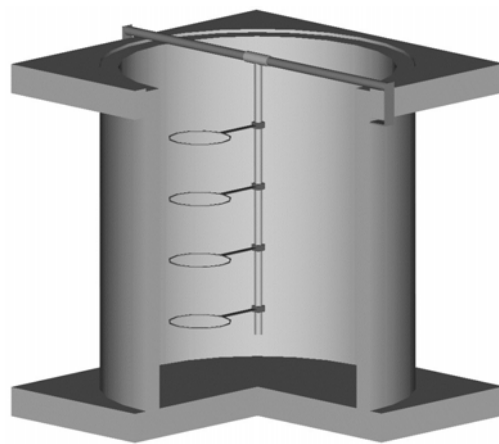
Für das Einformen des Modells im Quarzsand erwiesen sich die Einstellungen der Unwuchtscheiben auf Position 1 bis 4 als gut geeignet, da hier mit der schrittweisen Erhöhung der Drehzahl, die Beschleunigung des Formbehälters ebenfalls schrittweise, und nicht so sprunghaft wie bei den Übrigen, ansteigt.

Durch Erhöhung der Sandmasse von 380 kg (halb voll) auf 760 kg (voller Behälter), verschieben sich die Punkte, an denen der Wert 1 g erreicht wird, weiter in Richtung höherer Drehzahlen, weil eben diese höhere Drehzahl die der größeren Masse entsprechende Erregerkraft erst erzeugt (**Bild 40**). So wird zum Beispiel der 1-g-Wert bei Scheibenposition 1 erst bei einer Drehzahl von ca. 1980 U/min erreicht. Außerdem führt die Masseerhöhung infolge einer sich daraus ergebenden größeren Massenträgheit dazu, dass das „Springen“ des Behälters und die daraus folgenden Erschwernisse bei der Auswertung der Schwingungskurven zu höheren Beschleunigungswerten verschoben werden.

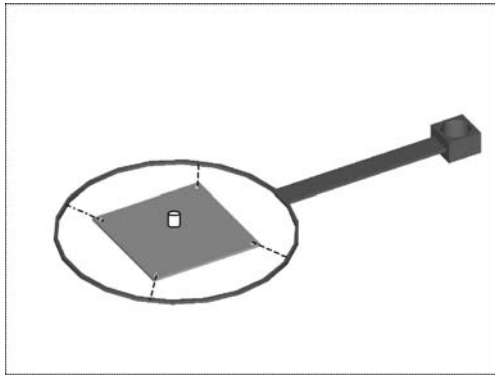
#### – *Messung der Sandbeschleunigung*

Da die Bewegung des Sandes im Behälter letzt endlich entscheidend über das Einform- und Verdichtungsverhalten der Vibrationsanlage ist, wurde die dem Sand erteilte Beschleunigung unter zu Hilfe-nahme einer speziell dafür entwickelten und im **Bild 50** dargestellten Halterung gemessen. Der Zweck der Spezialkonstruktion bestand darin, die Aufnehmer so zu befestigen, dass der Einfluss der Behälterschwingungen auf die Messergebnisse möglichst minimiert (gegen „Null“

tendierend) wird und sie dennoch „auf Position“ gehalten werden. Dazu wurde quer über dem Behälter ein Haupt-träger angebracht, an dem eine weitere senkrecht in den Behälter hineinragende Stange befestigt wurde, an der dann die vier Rundbügelhalterungen mittels Klemmverbindung verschraubt wurden (**Bild 51**).



**Bild 50: Halterungen für Messung der Sandbeschleunigung**



**Bild 51: Positionierung des Sensors in der Halterung**

Mit diesem Aufbau sind auch alle potenziellen Messpunkte im Behälter erreichbar, da die Halterungen auf der senkrechten und diese auf der waagerechten Stange beliebig zu fixieren sind. Im **Bild 51** ist die Gestaltung der Halterung im Detail zu sehen. An einer massiven Klemmschelle, die zur Befestigung an der Stange dient, ist ein 30 mm breiter und 150 mm langer Arm und an dessen anderem Ende ein Ring mit einem Innendurchmesser von 200 mm verschweißt. Über vier Gummibänder wird in der

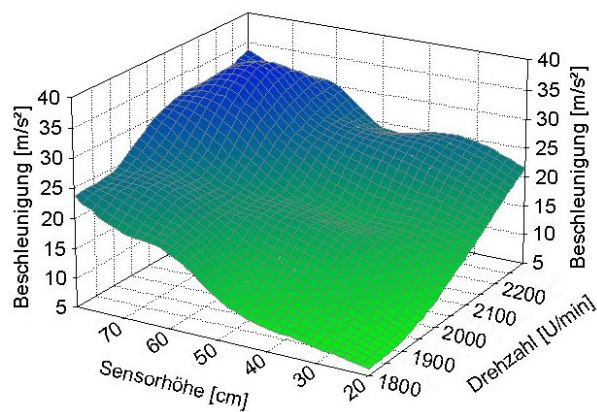
Mitte des Ringes ein quadratisches Blech mit der Kantenlänge von 100 mm fixiert. Im Zentrum des Bleches befindet sich eine Gewindebohrung (M3), in der dann der Beschleunigungsaufnehmer fest verschraubt wird.

Für die Messung der Sandbeschleunigung wurden insgesamt vier Beschleunigungsaufnehmer, wie in **Bildern 50, 51** beschrieben, befestigt, und zu Kontrollzwecken wurde ein weiterer Aufnehmer am Formbehälter angebracht. Unter Beachtung der in den voran gegangenen Beschleunigungsmessungen erzielten Ergebnisse wurden die Versuche ausschließlich mit der Unwuchtscheibenposition 4 mit 1/2, 3/4 und 4/4 voll gefülltem Behälter durchgeführt.

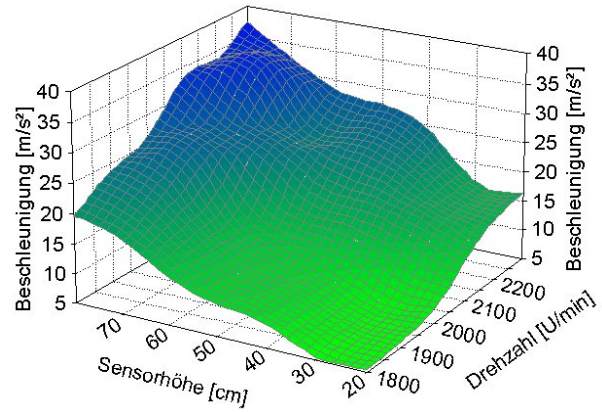
Die Messdauer betrug ca. 40 s. Die Auswertung erfolgte wiederum unter Nutzung des entwickelten Programms zur Berechnung der Mittelwerte, dazu wurde der Bereich von 20 bis 30 s der aufgenommenen Kurve ausgewählt. Die Drehzahl variierte wieder im Schrittmaß 50 und die Sensorhöhe von 20 bis 80 cm (in 10-er Schritten).

Aus eigenen, rein visuellen Eindrücken bei Verdichtungsversuchen und wie schon in der Literatur /49/ beschrieben, werden häufig signifikante Unterschiede zwischen den Sandbewegungen in der Mitte und am Rand eines Behälters beobachtet. Um das genauer zu ergründen, wurden beide Grenzfälle bezüglich ihres Beschleunigungsverhaltens untersucht. Auf Grund der konstruktiven Gegebenheiten (**Bild 51**) befindet sich die „Rand“-Stellung jedoch ca. 15 cm vom Behälterrand entfernt. Eine geringere Entfernung würde eine Verringerung des Durchmessers der Halterung erfordern und somit wiederum den Einfluss der Behälterbeschleunigung auf die Messwerte erhöhen.

Bei der Betrachtung der 3-D-Diagramme (**Bilder 52, 53**) ist augenscheinlich, dass die Unterschiede zwischen Rand und Mitte nicht so stark sind, wie vorher vermutet wurde. In beiden



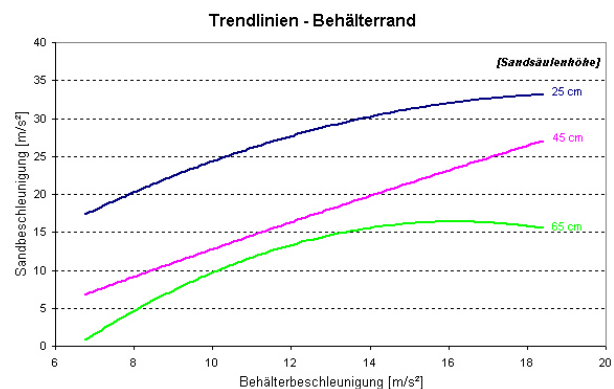
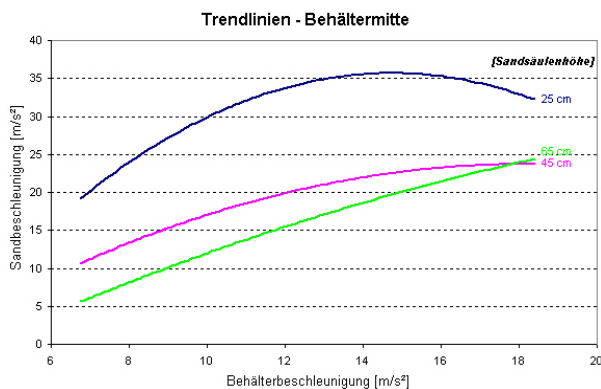
**Bild 52: Beschleunigung in Behältermitte**



**Bild 53: Beschleunigung am Behälterranda**

Bereichen nimmt die Beschleunigung mit der Drehzahl und der Sensorhöhe zu, am Rand von  $5,3 \text{ m/s}^2$  (bei  $1800 \text{ U/min}$  und  $20 \text{ cm}$ ) bis  $37,4 \text{ m/s}^2$  (bei  $2300 \text{ U/min}$  und  $80 \text{ cm}$ ) und in der Mitte von  $6,0 \text{ m/s}^2$  bis  $33,6 \text{ m/s}^2$ , wobei letztere ein Maximum von  $35,46 \text{ m/s}^2$  bei  $2200 \text{ U/min}$  und  $70 \text{ cm}$  aufweist.

Beide Diagramme sind Beleg dafür, dass mit zunehmender Stärke der Sandschicht mehr Energie (höhere Drehzahlen) benötigt wird, um die für die Einformung und Verdichtung wichtige Beschleunigung von  $1 \text{ g}$  (und mehr) zu erzielen. Und sie zeigen, dass die Differenz zwischen den oberen und unteren Sandschichten beträchtlich sein und bis zu  $2 \text{ g}$  betragen kann. D. h., wenn in den unteren Schichten für deren Verdichtung Beschleunigungen von über  $1 \text{ g}$  erzielt werden müssen, beschleunigen die oberen auf ca.  $3,5 \text{ g}$ . Ein einzuformendes Modell sollte einer derartigen Beschleunigung nicht ausgesetzt werden, da hier dessen Deformation bzw. Zerstörung provoziert würden.



**Bilder 54 und 55: Sandbeschleunigungen in Abhängigkeit von Behälterbeschleunigungen**

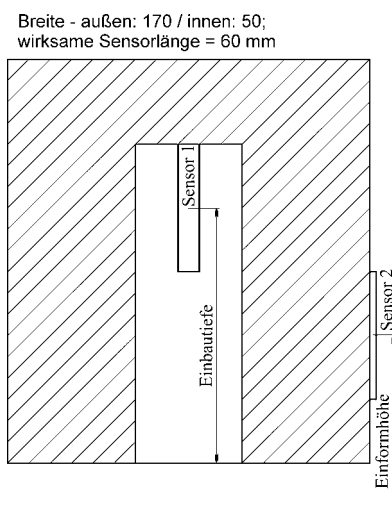
Bezieht man nun die erzielten Sandbeschleunigungen auf die bei den Drehzahlen (**Bilder 52, 53**) erzeugten Behälterbeschleunigungen, erhält man die in den **Bildern 54 und 55** dargestellten Abhängigkeiten, die die Differenzen zwischen den oberen und den unteren Sandschichten eindrucksvoll bestätigen. Allgemein nehmen die Beschleunigungen des Sandes mit der des Behälters zu, bis auf die beim 25-cm-Level in der Behältermitte, die oberhalb der Behälterbeschleunigung von ca.  $14 \text{ m/s}^2$  eine deutlich fallende Tendenz zeigt. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass auf Grund der dem Sand zuzuordnenden Massenträgheit **a)** eine bestimmte Mindestenergie (–drehzahl) zugeführt werden muss, um ihn überhaupt erst einmal in Bewegung zu versetzen, und **b)** oberhalb einer bestimmten Drehzahl (Frequenz) die Sandbeschleunigung abnimmt und gegen Null sich bewegt, weil der Sand den schnellen Wechseln der Bewegungsrichtung nicht mehr zu folgen vermag. Bewiesen wurde diese Tatsache mit Versuchen, die mit einer Ultraschallerregung durchgeführt wurden und bei denen der Sand im Ausgangszustand verharrte.

Weiterhin ist zu beobachten, dass mit zunehmender Sandsäulenhöhe die erzielten Beschleunigungen erwartungsgemäß abnehmen, teilweise gar unter die Werte des Behälters. Zu begründen ist dieser Sachverhalt damit, dass dem Sand für seine Bewegung mit der Beschleunigung des Behälters die dafür benötigte Energie zugeführt wird. D. h., die Summe der zugeführten Energie in Form der Behälterschwingungen ist gleich der Summe der aufgenommenen Energie in Form der mittleren Sandbeschleunigung, abzüglich eines Verlustbetrages, da jeglicher realer Energietransfer stets mit einem Energieverlust verbunden ist. Die mittlere Sandbeschleunigung ergibt sich aus den über das gesamte Volumen gemittelten Werten der Einzelbeschleunigungen, die jeweils für den entsprechenden Messort, einem differenziell kleinem Volumenteil, gemessen wurden. Und das bedeutet letzt endlich, dass es bei vorhandenen Zonen mit einer höheren Beschleunigung als die des Behälters auch Bereiche geben muss, die eine zum Teil erheblich niedrigere Sandbeschleunigung als die Behälterbeschleunigung aufweisen. Die tatsächliche mittlere Sandbeschleunigung kann als mathematische Unterstützung dieser Hypothese leider nicht berechnet werden, weil dazu insbesondere die Werte im Grenzbereich Sand – Behälter aus den Gründen, wie sie zum **Bild 51** erläutert wurden, nicht ermittelt werden konnten.

#### 4.3.3.3. Verdichtungsmessungen

##### – Erläuterung

Die Verdichtungsversuche wurden ausschließlich mit der bei den Beschleunigungsversuchen als optimal herausgefundenen Unwuchtscheibenposition 4 (**Bild 38**) durchgeführt, da wie im **Bild 49** ersichtlich ist, die Beschleunigungskurve der Position 4 im Bereich von ca. 2000 U/min bis ca. 2400 U/min ein proportionales Verhältnis zu den erzielbaren Beschleunigungswerten aufweist. Zur Messung der Verdichtung des Formstoffes kamen zwei Sensoren, die am Modell außen bzw. im Modell innen befestigt waren, zum Einsatz. Anhand des Modells 1 (**Bild 56**) sollte mit dem Sensor 1 die in der Vertiefung erzielbare Sandfüllung und -verdichtung in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz, der Größe der Vertiefung und der Einformhöhe unter Berücksichtigung der Behälterfüllung ermittelt werden. Mit dem Sensor 2 wird die Sandverdichtung in Abhängigkeit von der Frequenz, der Einformhöhe und der Behälterfüllung erfasst. Für die räumliche Fixierung des Modells im Behälter wird die für die Beschleunigungsmessungen genutzte Halterungskonstruktion in modifizierter Form verwendet. Dazu werden die Modellecken von Oben und Unten jeweils ca. 2 cm tief abgeschnitten, aus zwei Halterungen die Bleche inklusive Gummibänder entfernt und das Modell von Oben und Unten in je einer Halterung festgeklemmt (**Bild 57**).



**Bild 56: Modell 1 (Schnitt)**



**Bild 57: Modell 1 – Befestigung im Behälter**

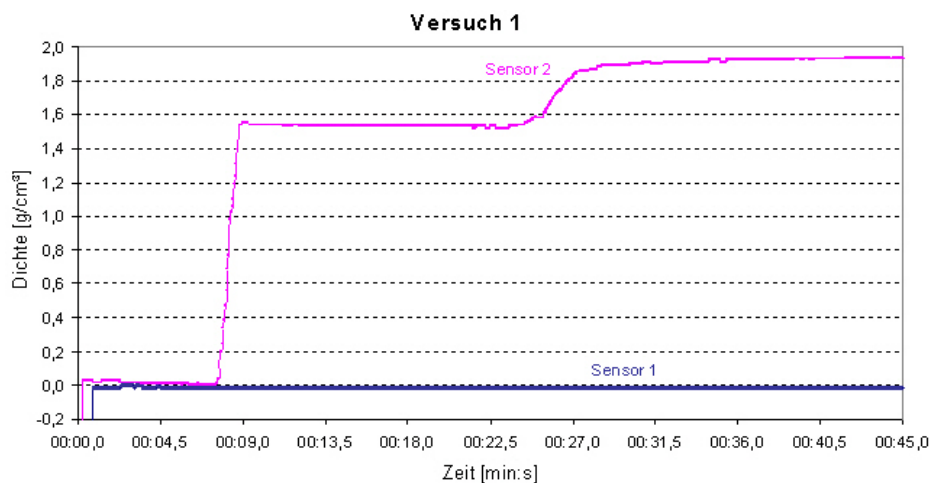
Die Vibrationszeit des Tisches für eine Messung betrug beim Modell 1 bis zu 5 min. Die Drehzahl der Vibratoren wurde in dem entsprechend der Füllhöhe und der Scheibenposition 4 mit den Beschleunigungsversuchen ermitteltem Bereich variiert.

## Messungen und Ergebnisse

### a) halb voller Formbehälter:

Die Versuche mit dem halb vollem Behälter dienten zur Ermittlung der sinnvollen Einbautiefe des Sensors **1**, da mit dem Modell **1** die Möglichkeiten zur Füllung von Hohlräumen und Hinterschneidungen untersucht werden sollten. Bereits bei der Herstellung des Modells wurde darauf geachtet, dass mit einer Schrittweisen Einkürzung die Einbautiefe reduziert werden kann. Als möglicher Kürzungsschritt wurden 2 cm festgelegt, mit dem Drahtschneidegerät wurde diese dann durchgeführt und die verbleibende Einbautiefe anschließend genau ausgemessen.

Begonnen wurde mit einer Drehzahl der Vibratoren 1760 U/min und einer Einbautiefe des Sensors **1** von 12 cm. Die Drehzahl wurde in den weiteren Versuchen in 20er Schritten bis auf max. 2100 U/min gesteigert. Wenn der außen angebrachte Sensor **2** in Form von nicht mehr auswertbaren Kurven Hinweise auf ein beginnendes Abheben des Behälters lieferte, wurde vorher abgebrochen.



**Bild 58: Einformverhalten des Modell 1 bei 1760 U/min**

Im Diagramm (**Bild 58**) ist der normale und zu erwartende Kurvenverlauf am Modell außen (Sensor **2**) zu sehen. Nach ca. 9 s wurde die Schüttdichte erreicht, und nach dem Erreichen der festgelegten Füllhöhe wurden die Vibratoren eingeschaltet, und der Verdichtungsprozess setzte ein. Am weiteren Kurvenverlauf des Sensors **2** war keine weitere Steigerung zu erkennen, so dass der Versuch nach 45 s Gesamtdauer beendet wurde. Der Sensor **1** zeigte keine Steigerung gegenüber dem Ausgangswert, was bei dieser Einbautiefe auch nicht unbedingt erwartet wurde.

Nachdem die Erhöhung der Drehzahl und die Veränderung der Einformhöhe bezüglich des Verhaltens des Sensors **1** keine Dichtesteigerung bewirkten, wurde danach mit den Versuchsreihen mit den (Schritt weise) reduzierten Einbautiefen begonnen, die aber für diesen Sensor alle kein auswertbares Ergebnis brachten. Nach Erreichen der Einbauhöhe von 5,5 cm wurde das Modell vorerst nicht weiter eingekürzt, sondern die Hoffnung darin gesetzt, dass mit der Erhöhung der zugeführten Sandmenge sich der Hohlraum messbar füllt.

#### b) drei viertel voller Formbehälter

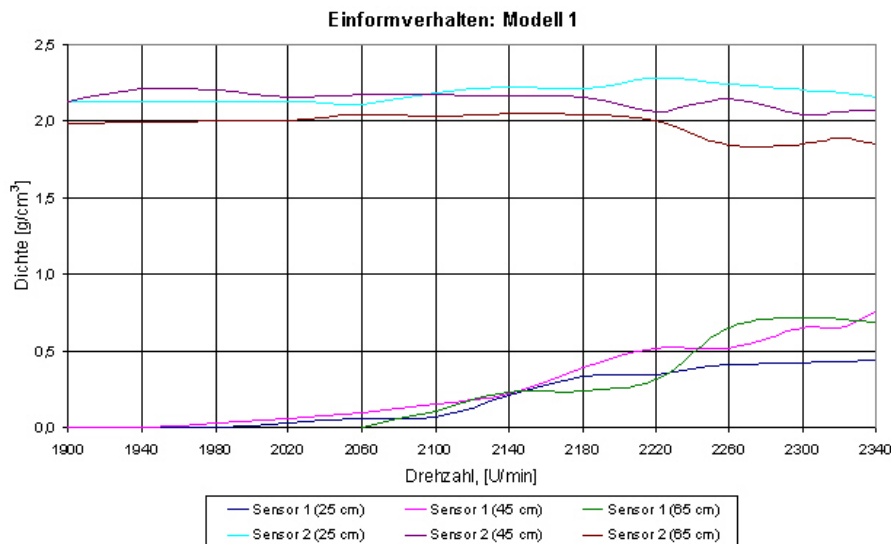
Für die Abstufung drei viertel voll betrug die Füllhöhe des Formbehälters 72 cm, die einer Sandmasse von 570 kg entspricht. Die Drehzahl wurde von 1900 U/min in 20er Schritten auf 2100 U/min variiert, die Dauer pro Versuch auf ca. 60 s festgelegt und die Einformhöhen (Höhe des Sensors **2**) von 32 cm in 5er Schritten auf 62 cm erhöht. Während der Sensor **2** stets eine gute Verdichtung von ca. 30 % anzeigte, verharrte der Sensor **1** auf dem Wert „Null“.

#### c) voller Formbehälter

Gemäß **Tabelle 3** sind jetzt insgesamt 1360 kg in Bewegung zu versetzen. Die Drehzahl wurde von 1900 U/min in 40er Schritten auf 2340 U/min variiert, die Dauer pro Versuch auf max. 6 min festgelegt und die Einformhöhen von 32 cm in 10er Schritten auf 82 cm erhöht.

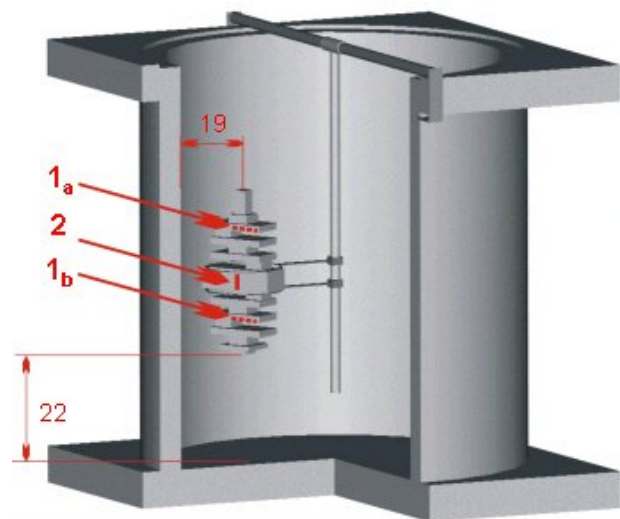
Mit dem vollen Behälter wurde auch erstmalig ein zaghaftes Füllen des Hohlraumes ermittelt, das jedoch erst meist nach ca. 50 s nach Vibrationsbeginn einsetzte, weshalb die Versuchszeit bis auf 6 min erhöht wurde, um eben nicht den Versuch unmittelbar nach dem Beginn des messbaren Befüllens des Hohlraumes abubrechen. Um jedoch die Aussagefähigkeit zu erhöhen, wurde die Einbautiefe nochmals auf 3,2 cm reduziert.

Im Diagramm (**Bild 59**) wird sichtbar, dass in der Behältermitte Sanddichten von  $2,0 \text{ g/cm}^3$  und mehr erreicht wurden, bei hohen Drehzahlen und im oberen Bereich des Behälters lagen die erreichbaren Dichtewerte bei  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , was auf den großen Beschleunigungswerten in dieser Zone basierte. Die mit dem Sensor **1** gemessene Hohlraumbefüllung setzt im oberen Bereich (65 cm Einformhöhe) bei dem Drehzahlbereich von ca. 2000 U/min ein und erreicht bei 2260 U/min einen Wert von  $0,75 \text{ g/cm}^3$ , der ca. einer 50 %-igen Sensorbedeckung entspricht. Das Einform- und Verdichtungsverhalten des Modells zeigte am Rand keine wesentlichen Abweichungen zur Behältermitte, die Hohlraumbefüllung erreicht nur ca.  $0,5 \text{ g/cm}^3$  ( $\approx 30 \%$  Sensorbedeckung), so dass auf diese Darstellung hier verzichtet wurde.



**Bild 59: Modell in der Mitte des Behälters positioniert**

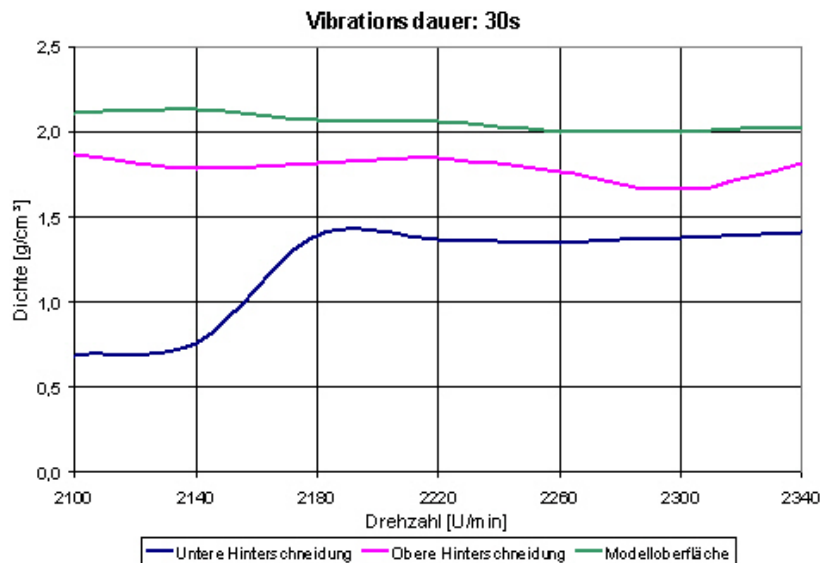
Die Versuche mit dem Modell **2** (**Bild 60**), einem Kurbelwellen ähnlichem Prototyp, wurden ebenfalls unter Nutzung der auch für das Modell **1** verwendeten Spezialkonstruktion (**Bild 57**) durchgeführt. Der Sensor **1** diente wiederum zur Ermittlung der Sandfüllung und -verdichtung in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz an einer kritischen Stelle (hier: Unterseite Pleuelflanke), einmal am oberen (**1<sub>a</sub>**) und einmal am unteren Ende (**1<sub>b</sub>**) der Kurbelwelle. Der Sensor **2** soll den Vergleich der mit dem Modell **1** ermittelten Daten ermöglichen. Die Einformhöhe, hier festgelegt als der Abstand des Modells von der Unterkante bis zum Behälterboden, beträgt **22** cm; die Kurbelwellenachse ist von der Wand **19** cm entfernt.



**Bild 60: Modell 2 – Befestigung im Behälter**

Die Versuche mit dem Modell **2** (**Bild 60**) wurden ausschließlich mit vollem Behälter durchgeführt. Die Ergebnisse sind in dem Diagramm **Bild 61** dargestellt, da hier ebenfalls ein analoges Verhalten bezüglich der Verdichtung am Rand und in der Mitte festgestellt wurde, kann auf die Darstellung des Randverhaltens verzichtet werden. Bei den Versuchen waren die Sensoren **1** auf der oberen bzw. unteren Hinterschneidung und **2** auf der Außenfläche in der Mitte des Modells befestigt.





**Bild 61: Modell 2 – Behältermitte**

Die Kurvenverläufe zeigen, dass bereits nach 30 s gute Dichtewerte erreicht wurden, ohne Probleme bei der oberen Hinterschneidung, während bei der unteren ab einer Drehzahl von 2180 U/min auch schon gute Werte erzielt wurden. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Parameter für die anschließend durchgeführten Gießversuche festgelegt.

#### 4.3.3.4. Gießversuche

Für die Gießversuche wurden stufenförmige, Kurbelwellen nachempfundene Modelle aus PMMA mit verschiedenen Eingusssystemen gefertigt, mit einer Schlichte von 0,4 – 0,8 mm Schichtdicke überzogen und bei einer Temperatur von 30 – 40 °C getrocknet.

Beim Einfüllen wurde der Formbehälter bis zu einem Drittel mit Sand gefüllt und bei 1800 U/min 15 s lang vibriert. Auf dem so erzeugten, vorverdichteten Sandbett wurde nun das Modell mit einen speziellen Halter fixiert. Dem folgte die Befüllung (voll) des Formbehälters und anschließend die Verdichtung entsprechend einem festgelegtem Vibrationsregime, dass von 2220 bis 2260 U/min variierte, die Vibrationsdauer betrug 30 bzw. 40 s. Da sich bei der Verdichtung das Sandvolumen verringerte, war eine dem entsprechende Nachfüllung erforderlich. Vor dem Nachfüllen wurde der Spezialhalter abgebaut und der nachgefüllte Formbehälter anschließend noch einmal 10 s mit dem gleichen Regime vibriert. Als Gießmaterial wurde GGL25 und für die Kontrolle des Metallanstieges Al–Cr–Thermodraht verwendet.

Da auch die Einförmigkeit und das gewählte Angusssystem Einfluss auf das erzeugte Gussstück besitzt, wurden hier verschiedene Möglichkeiten, einschließlich einer waagerechten

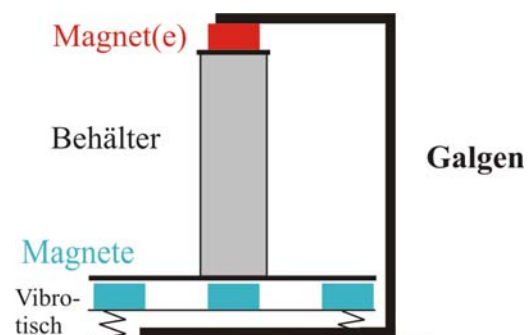
Modelllage, getestet. Die Gießtemperatur variierte in einem Bereich von 1383 bis 1419 °C, bei einem Versuch wurde mit einer Temperatur von 1478 °C bewusst überhitzt abgegossen.

Die Überhitzung hatte das Ziel, bei dieser Variante – senkrechte Einformlage, bei der das Metall nur über einen Querlauf von Unten zugeführt wurde – ein vorzeitiges Abkühlen der Schmelze auf die Solidus-Temperatur vor der vollständigen Formfüllung zu vermeiden. Die vorzeitige Abkühlung konnte zwar vermieden werden, jedoch traten verstärkt andere Gießfehler auf, wie Verbrennungen am Einguss und unteren Teil des Gussstückes, Formstoffeinbrennungen, sowie Aufweitungen am Einguss unter der Wirkung des Metalldrucks auf Grund einer unzureichenden Schlichtedicke.

Die ungenügende Schlichteschicht war im Wesentlichen auch die Hauptursache bei den Gießfehlern, die zum Auslaufen des Metalls bzw. zu verbrannter Oberfläche führten. Ein anderes Gussteil wies oberflächige Gasporen auf Grund von überflüssigem Kleber auf. Gießfehler, die auf das Einform- und Verdichtungsregime zurückzuführen wären, traten somit nicht auf.

#### 4.4. Untersuchungen zum Einschwingverhalten

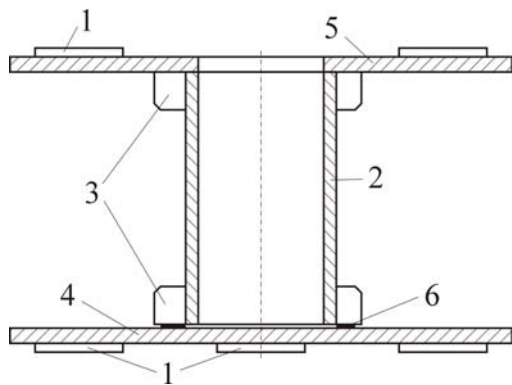
Mit den Einschwingversuchen sollte Klarheit darüber geschaffen werden, ob sich die im **Pkt. 2.7. Analyse der Literaturauswertung – Problemstellung** diskutierten negativen Erscheinungen beim Vibrationsbeginn vermeiden lassen, wenn der Formstoffbehälter aus der Ruhelage auf den bereits eingeschwungenen Vibrationstisch fällt und dort während des Schwingens fixiert wird. Ein solches Szenario erfordert die Verwendung von Haltevorrichtungen, die zum Einen über dem Tisch angebracht sind, um den Behälter vor dem „Fall“ fest zu halten, und zum Anderen auf dem Vibrotisch befestigt sind, um ihn danach „einzufangen“ und auch während der Vibration noch ausreichenden Halt zu bieten. Für derartige, ein- und ausschaltbare Haltevorrichtungen bietet sich die Nutzung von Haftmagneten an, der einzusetzende Formstoffbehälter sollte jedoch nicht zu groß und schwer sein, um nicht zu große Magnete verwenden zu müssen und auch noch weitergehende Untersuchungen durchführen zu können. Konstruktiv wurde die Aufgabe durch die Nutzung eines Doppelgalgens, d. h., zweier parallel angeordneter Galgen ( *Bild*



**Bild 62: Galgenkonstruktion**

62), die an ihrem oberen Ende mit einem **Magneten** vom Typ HT-D70-F bestückt wurden, gelöst. Das Bild zeigt den Behälter vor dem „Fall“ am Galgen hängend, die Bodenplatte des Behälters besitzt zu den am Tisch befestigten 4 **Magneten**, **gleichen Typs** und gleichmäßig verteilt auf dem Umfang eines gedachten Kreises, einen Abstand von 3 mm.

Als Formstoffbehälter wurde eine Spezial-Leichtbau-Konstruktion (**Bild 63**) eingesetzt. Um

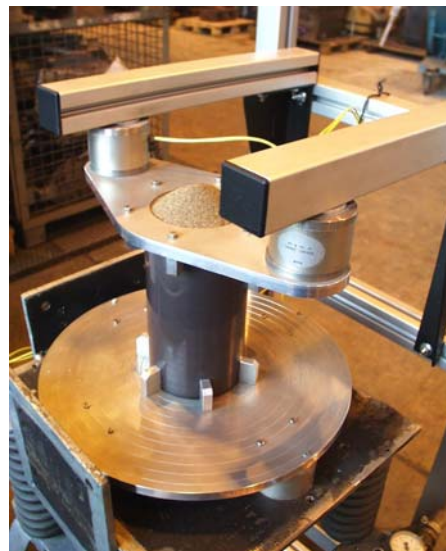


**Bild 63: Skizze „Spezial-Konstruktion“**

die Bewegungen des Sandes beobachten und mit der Videokamera dokumentieren zu können, wurde ein Zylinder (2) aus Pyacryl mit einem Innendurchmesser von 10 cm und einer Höhe von 20 cm verwendet. Vermittels jeweils 6 Halteklötzchen (3) sind die Bodenplatte (4) und die Oberplatte (5) am Pyacrylzylinder verschraubt. Die Haltebleche (1) aus Stahlblech, die als Kontaktflächen für die Haftmagnete dienen, sind mit je drei Senkkopfschrauben an der Ober- bzw. Unterplatte,

die beide wie auch die Halteklötzchen aus Aluminium gefertigt wurden, befestigt. Um eine Befüllung dieses am Galgen hängenden Spezialbehälters zu ermöglichen, besitzt die Oberplatte in der Mitte eine dem Innendurchmesser des Zylinders entsprechende Öffnung. Auf der runden Bodenplatte wurden konzentrische Markierungen (**Bild 64**) eingraviert, um Hilfslinien für die Auswertung von Ausfließversuchen zu haben. Ein dafür erforderlicher gleichmäßiger Spalt zwischen der Zylinderunterkante und der Bodenplatte wurde durch den Einsatz von Distanzhülsen (6) – **Bild 63** erzeugt.

Weiterhin wurden für diese Versuche die horizontalen Vibratoren entfernt und jeweils gegenüber der verbliebenen Befestigungsplatten ein dementsprechender Masseausgleich angebracht, um eine möglichst ungestörte vertikale Vibration erzeugen zu können. Diesem Zweck diente auch die exakte waagerechte Ausrichtung des Vibrotisches (inklusive Spezial-Konstruktion).



**Bild 64: Galgen mit Spezialkonstruktion**

#### 4.4.1. Versuchsdurchführung

Wie bereits erläutert, spielten bei dieser Versuchserie die Haftmagnete eine „tragende“ Rolle, für deren Stromversorgung diente ein Transformator, mit dem eine Gleichspannung von 24 Volt erzeugt werden konnte. In der Ausgangsstellung waren die Magnete am Galgen ein- und die auf dem Vibrotisch ausgeschaltet, und über eine Wechselschaltung wurde der Einschwingvorgang gestartet, indem jetzt die Magnete auf dem Tisch ein- und die am Galgen ausgeschaltet wurden. Für die Versuchsdurchführung war es wichtig, zum Einen zu verhindern, dass der Spezialbehälter an den jeweils ausgeschalteten Magneten anschlägt, und zum Anderen den „freien Fall“ des Behälters auf ein Minimum zu beschränken, weshalb als Kompromisslösung in der Ausgangslage zwischen Magneten und Kontaktflächen ein Abstandspalt von 3 mm (**Bild 62**) eingestellt wurde.

Für die kontinuierliche Befüllung des Behälters wurde unter Zuhilfenahme eines Trichters die vorher abgemessene Sandmenge in die Zylinderöffnung inklusive eines Schüttkegels (**Bild 64**) gefüllt. Für die Verdichtungsmessung wurde der Sensor 1 an der Innenseite des Zylinders und für die Beschleunigungsmessung der Aufnehmer an der Oberplatte unmittelbar neben der Einfüllöffnung befestigt. Für die Messung der Tischbeschleunigung wurde ein Sensor auf der Oberseite des Tisches mittig platziert.

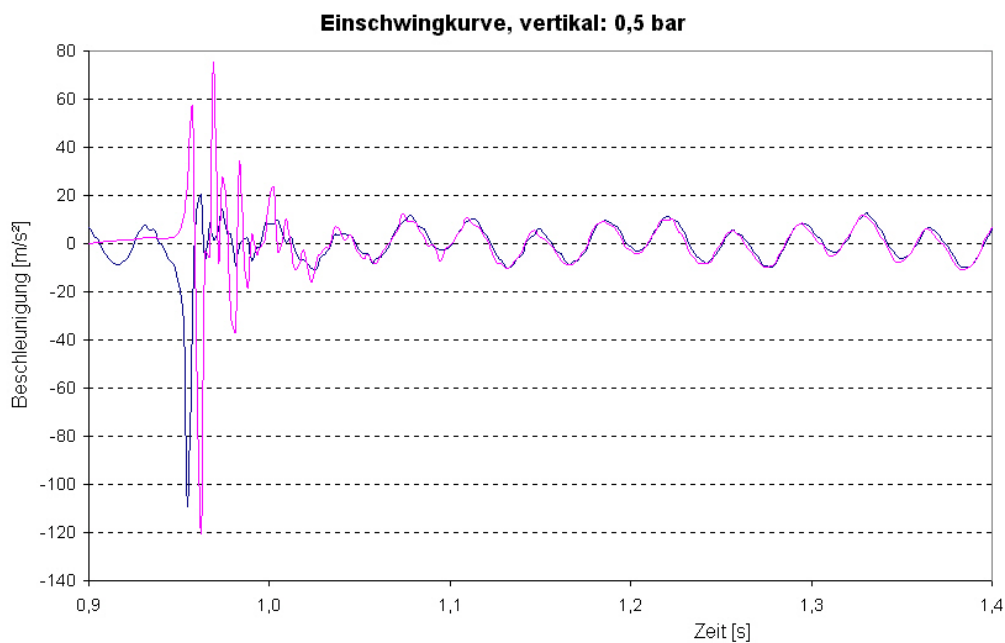
Neben den Beschleunigungs- und Verdichtungsmessungen wurden auch die Sandbewegungen während der Vibration und bei den Ausfließversuchen das Fließverhalten per Videoaufnahme bzw. Bild (jeweiliger Endzustand) festgehalten. Weiterhin wurde die ausgeflossene Sandmenge anhand der Abnahme der Sandhöhe bestimmt. Um einen gleichmäßigen Spalt einstellen zu können, wurden Normteile in verschiedenen Kombinationen genutzt, was zu den Spaltschritten 0 mm (kein Spalt = kein Ausfließen); 1,6; 2,4 und 3,2 mm führte.

#### 4.4.2. Versuchsauswertung

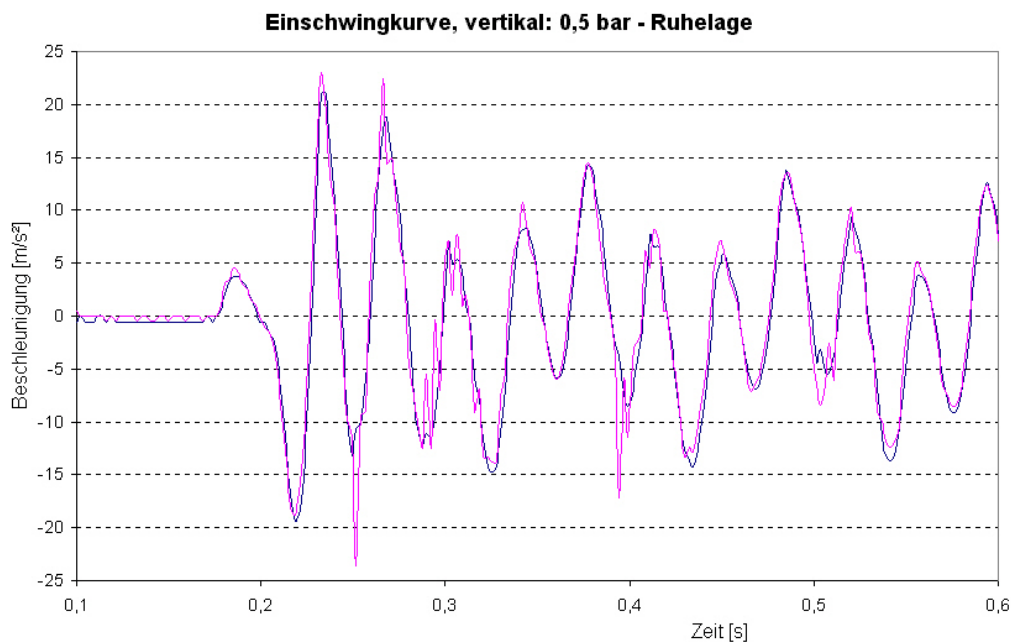
Auf Grund der gewählten Leichtbauweise ließ sich die Anlage aus dem Betrachtungswinkel der Regelgröße Druck nur bis 2,5 bar ausfahren, da der Tisch nicht im Boden verankert war. Bei näherer Betrachtung der erzielten Ergebnisse kann man jedoch zu der Überzeugung gelangen, dass das für die Versuchsdurchführung sicherlich auch nicht nötig gewesen wäre.

Vor den Versuchen wurde angenommen, dass bei jedem Start eines Verdichtungsversuches mit dem Einschalten des(r) Vibrators(en) durch diesen Schlag artigen Belastungsbeginn Be-

schädigungen des Modells eintreten könnten, die bei eventuell anderer Verfahrensweise vermieden würden. Die Auswertung der Einschwingkurven zeigt aber, dass das Fallenlassen des Behälters aus der Ruhelage auf einen bereits eingeschwungenen Vibrationstisch diesbezüglich keine Vorteile bringt, sondern eher einen noch größeren Einschwingeffekt erzeugt. Im **Bild 65** ist deutlich zu sehen, wie die harmonische Schwingung des Tisches (blau) durch den Aufprall der Spezial-Konstruktion mit einem starken Schlag aus dem „Takt“ gebracht wird und dabei Beschleunigungen bis ca. 12 g auftreten.



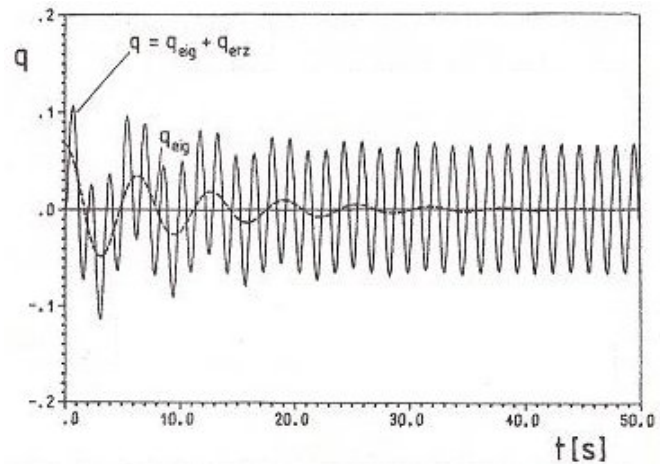
**Bild 65: Einschwingkurve – Behälter fällt auf eingeschwungenen Tisch**



**Bild 66: Behälter und Tisch beim gemeinsamen „Start“ aus der Ruhelage**

Stellt man dem den Kurvenverlauf gegenüber, der sich beim Einschwingen ergibt, wenn der Behälter bereits auf dem Tisch platziert ist, sind die dabei auftretenden Beschleunigungen wesentlich geringer ( $< 3 \text{ g}$ ), der auftretende „Schlag“ ist eher ein leichter Stoß (**Bild 66**).

Wie der Vergleich mit dem Lehrbuch /62/ (**Bild 67**) zeigt, entspricht der Verlauf der im **Bild 66** dargestellten Beschleunigungskurven dem Einschwingvorgang eines überkritisch angeregten Systems. Überkritisch deshalb, weil die erzwungene Schwingung in der Frequenz höher als die gedämpfte Eigenschwingung ist, d. h., es findet eine schnelle harmonische Schwingung um eine langsame, gedämpfte Eigenschwingung statt,



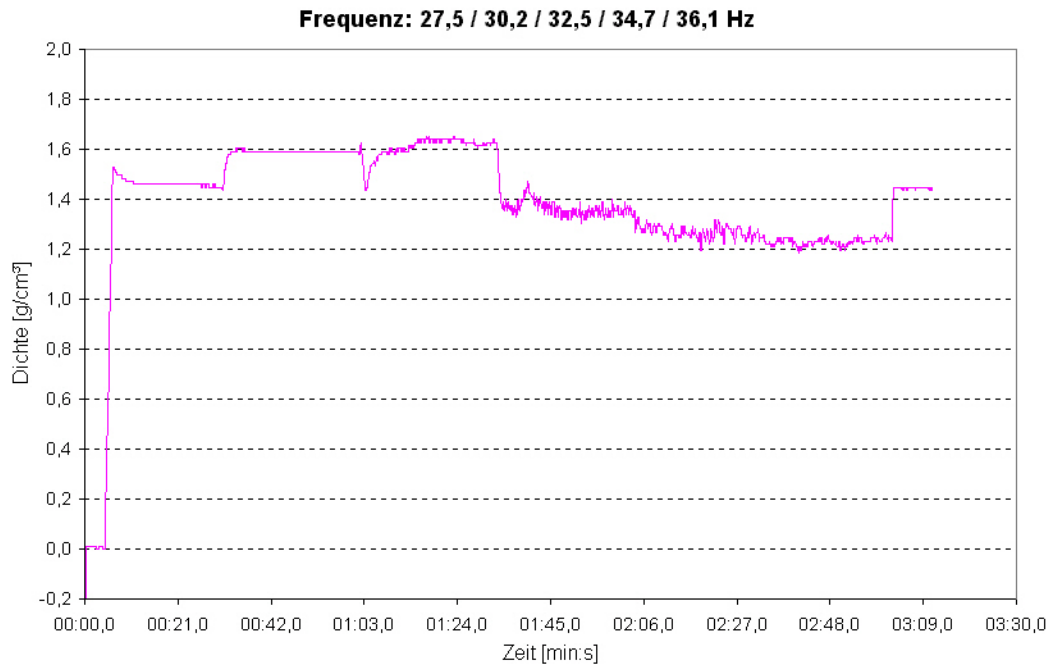
**Bild 67: Einschwingvorgang eines überkritisch harmonisch angeregten Systems /62/**

wobei letztere stetig abnimmt /62/. Für das Masse–Feder–System der verwendeten Versuchsanordnung (**Bild 59**) betrug die berechnete Eigenfrequenz 9 Hz und während die Erregung mit einer Frequenz von 27,5 Hz erfolgte.

Damit erweist sich die Methode, den Behälter aus der Ruhelage auf den bereits eingeschwungenen Tisch fallen zu lassen, um damit die negativen Einschwingfolgen nicht zu haben, als ungeeigneter Lösungsansatz. Da sich das Problem nicht auf direktem Wege lösen lässt, rückt die indirekte Lösung der mit der Behälterfüllung kombinierten Vibration, die bereits von einigen Unternehmen genutzt wird, um den technologischen Prozess zu „straffen“, unter diesem Blickwinkel der Vermeidung der Einschwingeffekte verstärkt in den Vordergrund.

Die Spezialkonstruktion mit dem ca. 20 cm hohen zylindrischen Sandbehälter, der quasi die obere Sandschicht in einem Formstoffbehälter symbolisiert, in der die Schwerkraft beim Befüllungs- und Verdichtungsverhalten in einem „normalen“ Behälter keine dominierende Rolle spielt, wurde weiterhin zu Untersuchungen des Verdichtungsverhaltens benutzt. Die Versuchsergebnisse, dargestellt am Beispiel des Kurvenverlaufes im **Bild 68**, bestätigen die bereits in der Vergangenheit gewonnenen Erkenntnisse dergestalt, dass in einer Sandschicht bis zu einer Gesamthöhe von 20 cm eine Verdichtung nur bei niedrigen Frequenzen stattfindet und es bei höheren Frequenzen zu einer Auflockerung des Sandes kommt /11/.





**Bild 68: Übergang – Verdichtung → Auflockerung**

Die per Video aufgenommenen Sandbewegungen bekräftigten die Aussage, da bis zu der Frequenz von 30,2 Hz der Sand sich nur in den oberen Schichten geringfügig bewegt, während er ab 32,5 Hz aufwärts anfängt regelrecht zu kochen, die Sandströmungen erreichen den Behälterboden und nehmen mit der Frequenz an Stärke zu.



**Bild 69 a: 1,6 mm Spalt**

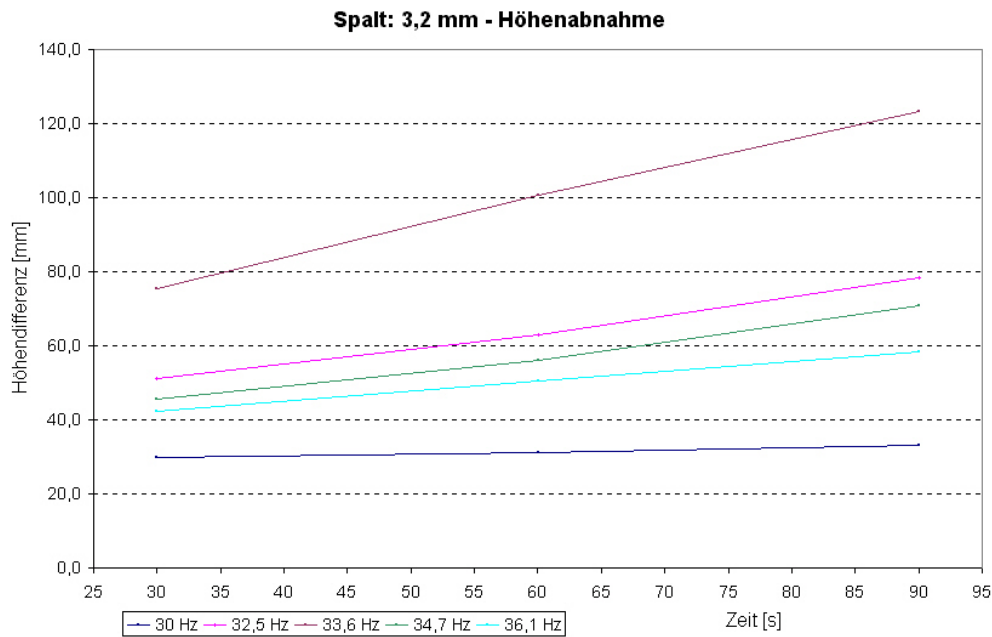


**Bild 69 b: 2,4 mm Spalt**



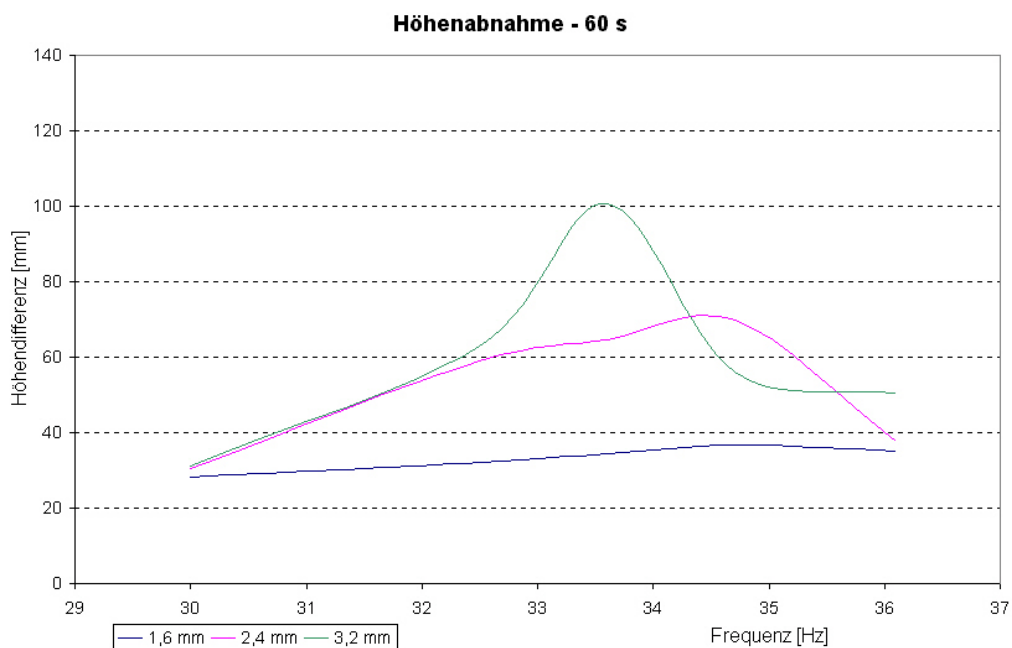
**Bild 69 c: 3,2 mm Spalt**

An diesem Verhalten ändert sich grundsätzlich auch nichts, wenn das Ausfließen untersucht wird. Bis zu der Frequenz von 30,2 Hz fließt unabhängig von der Spaltbreite fast kein Sand aus (**Bild 69 a–c**), das Video zeigt nur eine geringe Sandbewegung in den oberen Schichten und bei der Verdichtung werden nahezu gleiche Werte erreicht. Ab der Frequenz 32,5 Hz aufwärts beginnt mit dem Übergang zum Vibrokochen der Sand regelrecht zu fließen. Die ausgeflossene Menge, äquivalent als Höhenabnahme gemessen, ist abhängig von der Zeit, der Spaltbreite und der Beschleunigung bzw. der Frequenz und der Amplitude. Wie im **Bild 70** zu



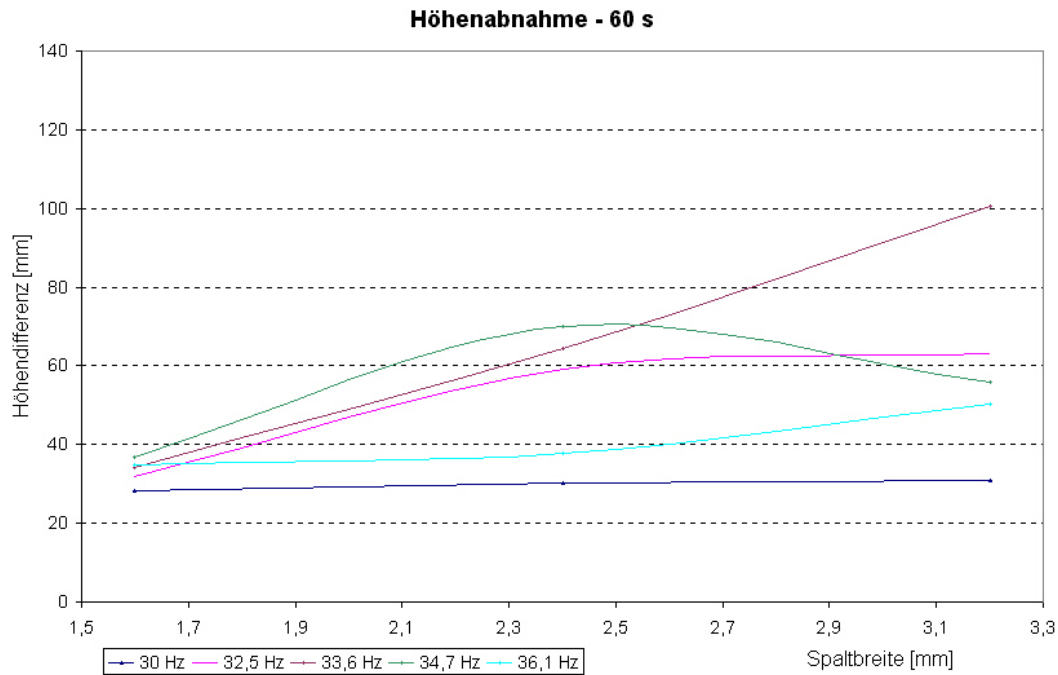
**Bild 70: Höhenabnahme in Abh. von der Zeit**

sehen ist, stellt sich im gewählten Zeitfenster eine nahezu lineare Zeitabhängigkeit ein. Bei den anderen Abhängigkeiten sind die Zuordnungen nicht so eindeutig feststellbar. Von der Erwartungshaltung her müsste eigentlich mit zunehmender Frequenz bzw. Spaltbreite die ausfließende Sandmenge zunehmen, aber die Versuchsergebnisse (**Bilder 71** und **72**) weichen von den Erwartungen teilweise recht stark ab. Wie im **Bild 71** zu sehen ist, ergibt sich beim



**Bild 71: Höhenabnahme in Abh. von der Frequenz**



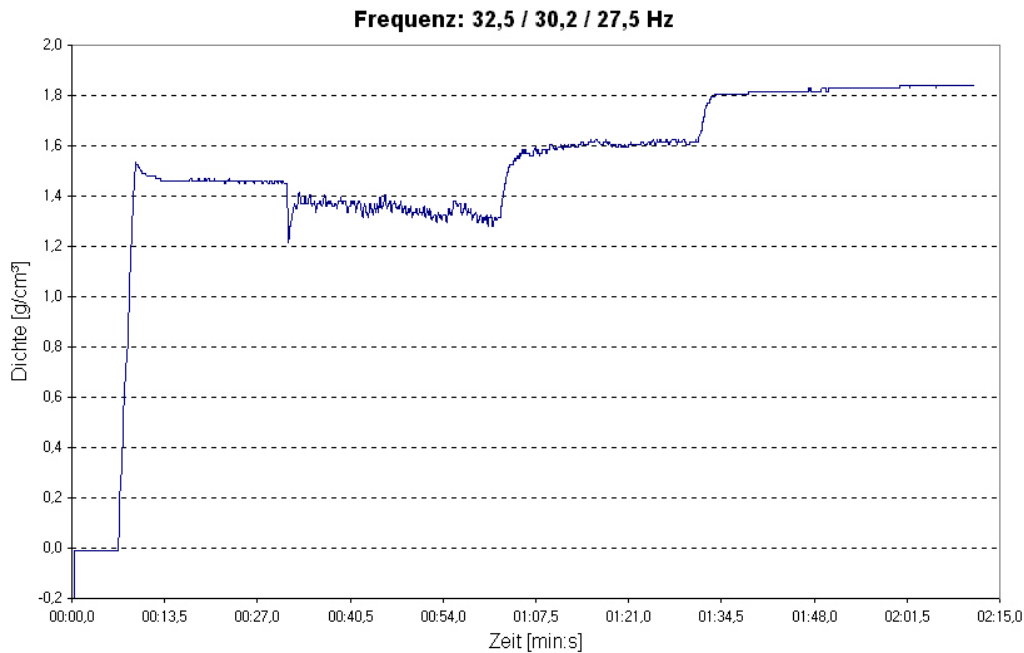


**Bild 72: Höhenabnahme in Abh. von der Spaltbreite**

3,2 mm Spalt bei einer Frequenz von 33,6 Hz ein ausgeprägtes Maximum und der Sandausfluss ist bei 36,1 Hz geringer als bei 32,5 Hz. Beim 2,4 mm Spalt „verschiebt“ es den Maximalwert in den Frequenzbereich von 34,7 Hz auf einem deutlich niedrigerem Level. Beim 1,6 mm Spalt passiert nicht allzu viel, der Sandausfluss nimmt mit der Frequenz geringfügig zu.

Das **Bild 72** zeigt, dass mit der wachsenden Spaltbreite allgemein der Ausfluss zunimmt, aber sich beim 2,4 mm Spalt bei 34,7 Hz ein Maximum herausbildet. Das korrespondiert mit den Kurven in **Bild 71**, die bei dieser Frequenz dem 2,4er Spalt einen höheren Ausfluss als dem 3,2er Spalt bescheinigen.

Weiterhin konnte der Übergang vom Zustand der Pseudoverflüssigung zum Vibrokochen anhand von Messdaten und Videoaufnahmen nachgewiesen werden. Die Pseudoverflüssigung mit ihren langsamen, oberflächlichen Fließbewegungen führt zu einer (geringen) Verdichtung des Sandes, die jedoch größer wird, wenn vorher eine Auflockerung stattgefunden hat (**Bild 73**). Das zeigt, dass neben der Auflockerung durch die stärkere Sandbewegung auch eine bessere Durchmischung des Sandes erreicht wird, die dann die Erzielung höherer Dichtewerte bei den anschließend verwendeten niedrigeren Frequenzen ermöglicht.



**Bild 73: Übergang – Auflockerung → Verdichtung**

## 5. 3-D-Vibration

Mit der Durchführung der 3-D-Versuche, d. h., der gleichzeitigen dreidimensionalen Erregung des mit Formsand gefüllten Behälters, sollte ein Ansatz für die systematische Untersuchung der räumlichen Bewegung des Sandes, der im Formsand stattfindenden Transport- und Verdichtungsvorgänge und deren möglichen Ausnutzung für das Befüllen von Hohlräumen und Hinterschneidungen gefunden werden. Dabei wurde mit voneinander unabhängigen, variablen Frequenzen und Amplituden gearbeitet, um eventuell sich ergebenden Abhängigkeiten und wechselseitige Beeinflussungen oder eine optimale Vibrationsrichtung zu ermitteln und auch einen Beitrag zur Lösung des Problems der maximal effektiven Frequenzen und Amplituden leisten zu können. Um nun die Befüllungs- und Verdichtungsvorgänge in einem Modellhohlraum zu beobachten, wurde ein dem entsprechendes Modell in unterschiedlichen Einformhöhen im Formstoffbehälter positioniert. Die Variation der Einformhöhe diente dazu, den Einfluss der Schwerkraft auf das Einfüll- und Verdichtungsverhalten zu überprüfen, da auch die Sandsäulenhöhe nachgewiesener Maßen /11/ einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den Einformprozess besitzt.

## 5.1. Versuchsstand

Für die Durchführung dieser dreiaxialen Vibrationsversuche wurde ein vorhandener Vibrationstisch entsprechend aufgerüstet, d. h., es wurde zu den beiden vorhandenen Vibratoren (ein vertikaler und ein horizontaler) senkrecht zu diesen ein weiterer horizontaler Vibrator hinzugefügt. Der Aufbau des Versuchsstandes ist im **Bild 74** dokumentiert und zeigt auf der linken Bildseite den Vibrotisch, in der Mitte die Messeinheit und rechts die Auswerteeinheit.

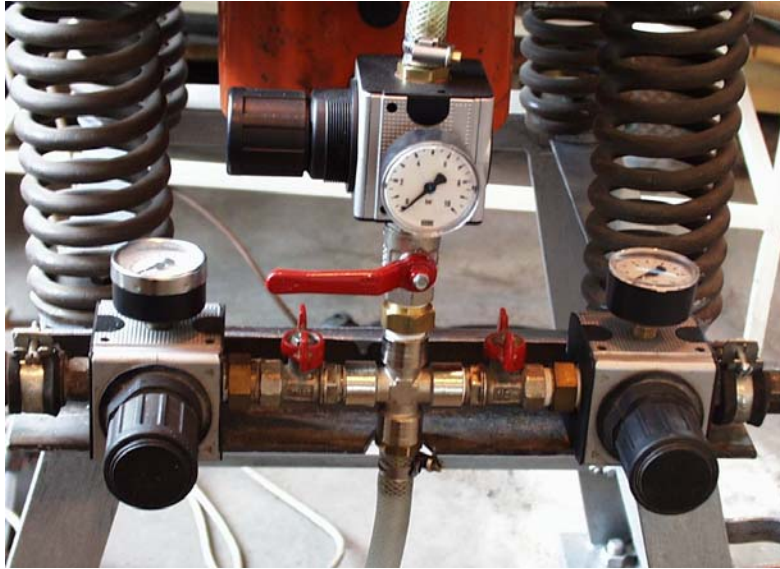


**Bild 74: Versuchsstand mit dreiaxialem Vibrationstisch**

Der 3-D-Tisch besteht aus einem Untergestell (Schweißkonstruktion), auf dem die Tischplatte mit vier Federn gelagert ist. An der Platte ist auf der Unterseite ein Vibrator mittig befestigt, an zwei benachbarten Stirnflächen sind die Befestigungsbleche für die beiden Horizontalvibratoren ebenfalls mittig und genau senkrecht zur Tischplatte angeschweißt. Auf der Platte wird der Behälter fest verschraubt. Der Behälter ist an seiner Frontseite mit einer Plexiglasscheibe versehen, so dass die Sandbewegungen und das Füllen der Hohlräume von an der Scheibe befestigten Modellen beobachtet werden können.

Um in Achsrichtung gerichtete Schwingungen erzeugen zu können, wurden für den 3-D-Tisch Freikolbenschwinger verwendet. Der Größere vom Typ NTS 50/10 dient der vertikalen, die beiden Kleineren vom Typ NTS 50/04 dienen der horizontalen Erregung.

Die Erregung der Vibratoren erfolgt mittels Druckluft, und über die Regulierung des Druckes wird die gewünschte Drehzahl eingestellt. Damit übernimmt der Druck die Funktion einer Stell- bzw. Regelgröße. Wie im **Bild 75** zu sehen ist, lassen sich die Erregerdrücke unabhängig voneinander für jede Vibrationsrichtung getrennt regeln.



**Bild 75: Druckregler**

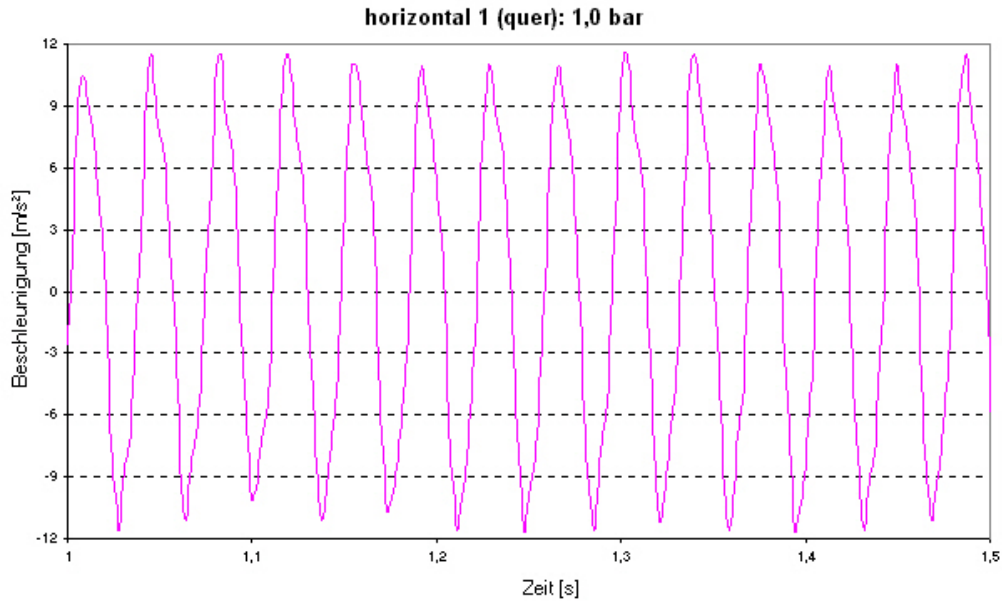
Die Messeinheit besteht aus den zwei bereits unter **Pkt. 3.1. Dichtemessungen** beschriebenen Messgeräten und den beiden daran direkt angeschlossenen Sensoren, mit denen die mit der Sandverdichtung einher gehenden Kapazitätsänderungen auf direktem Wege gemessen werden können. Damit entspricht der weitere Versuchsaufbau der Prinzipskizze im **Bild 14** und den dazu unter **Pkt. 3.1.1. Kalibrierung der Sensoren** gemachten Ausführungen.

## **5.2. Voruntersuchungen**

### **5.2.1. Ermittlung der Erregerfrequenzen**

Für die Ermittlung der Erregerfrequenzen in Abhängigkeit des eingestellten Druckes wurde der Beschleunigungsaufnehmer dem jeweiligen Vibrator genau gegenüber platziert, und aus den so gewonnenen Schwingungskurven (**Bild 76**) wurden die Frequenz ( $f$ ) und die Beschleunigung ( $b$ ) aus den Mittelwerten der Maxima unter Zuhilfenahme eines Makros ermittelt. Aus diesen Werten wurde die Amplitude ( $a$ ) nach der Formel  $a = b / (2 * \pi * f)^2$  (15) berechnet.

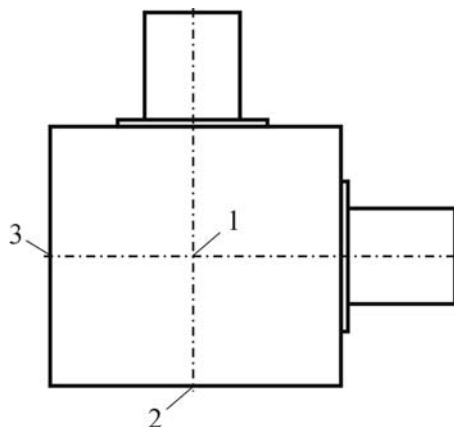
Wichtig für die Beurteilung des Verhaltens des Vibrationstisches unter dreidimensionaler Erregung ist es, die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Erregerschwingungen, ihre Wechselwirkungen untereinander und ihre Wirkungskombinationen zu untersuchen. Eine wichtige Rolle beim Vibrationsverhalten spielt auch die in Bewegung zu versetzende Masse, weshalb die Schwingungsuntersuchungen ohne und mit (leerem) Behälter und halb bzw. voll gefülltem Behälter durchgeführt wurden.



**Bild 76: Schwingungskurve – Beispiel: eindimensionale, horizontale Erregung**

#### 5.2.1.1. Versuche ohne Behälter

Für die Messung wurden die verwendeten Beschleunigungsaufnehmer am Vibrationstisch, wie dem **Bild 77** zu entnehmen ist, jeweils gegenüber einem Vibrator angebracht. Der im Messpunkt **1** befestigte Beschleunigungsaufnehmer misst die vertikalen Schwingungen und dem gegenüber liegend befindet sich auf der unteren Seite der Tischplatte (auf der Bildrückseite) der vertikale Kolbenschwinger vom Typ NTS 50/10. In den Messpunkten **2** und **3** werden die horizontalen Schwingungen gemessen und diesen Punkten gegenüber liegend befinden sich die horizontalen Kolbenschwinger vom Typ NTS 50/04. Für die Unterscheidung der beiden horizontalen Schwingungs- bzw.

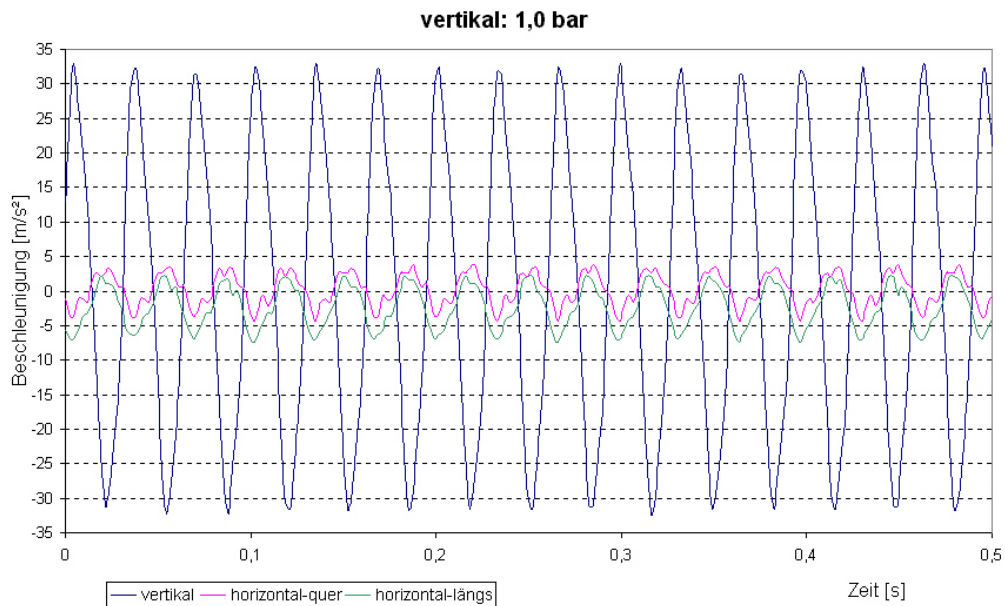


**Bild 77: Messpunkte für die Schwingungsmessung**

Vibrationsrichtungen wird für die dem Messpunkt **2** die Bezeichnung **horizontal 1** und für Punkt **3 horizontal 2** festgelegt.

Als Erstes wurde untersucht, wie sich das Schwingungssystem verhält, wenn nur ein Vibrator in Betrieb genommen wird. Im gewählten Beispiel in **Bild 78** wird deutlich, dass neben den in Vibrationsrichtung (hier: vertikal) gemessenen Beschleunigungen auch in den beiden horizontalen Richtungen Schwingungen mit jedoch deutlich geringeren Am-

plituden aufgenommen werden. Das ist der eindeutige Hinweis darauf, dass die Massen der Befestigungsbleche der horizontalen Vibratoren den Masseschwerpunkt aus der geometrischen Achse heraus bewegt haben.



**Bild 78: eindimensionale (vertikale) Erregung**

Dennoch scheinen die horizontalen “Begleitschwingungen” keine Eigendynamik zu entwickeln und irgend welche Rückkopplungseffekte mit der vertikalen Erregung zu bilden. Wie in der **Tabelle 4** zu sehen ist, schwingen sie mit der gleichen Frequenz wie die vertikale Hauptschwingung, aber ziemlich genau um eine halbe Periode zeitlich versetzt, so dass die Maximalwerte stets einem Minimum der Vertikalschwingung gegenüber liegen (**Bild 78**). Die er-

| Erregung                          | Druck [bar] | Frequenz [Hz] | Amplitude [mm]     | Beschleunigung [m/s²] |
|-----------------------------------|-------------|---------------|--------------------|-----------------------|
| <b>vertikal</b>                   | 1,0         | 30,6          | 0,866              | 31,97                 |
|                                   | 1,5         | 33,0          | 1,151              | 49,63                 |
|                                   | 2,0         | 34,7          | 1,303              | 61,77                 |
|                                   | 2,5         | 37,0          | 1,585              | 85,81                 |
|                                   | 3,0         | 39,0          | 1,639              | 98,24                 |
| <b>horizontal</b><br>(Richtung 1) | 1,0         | 30,5          | 0,101              | 3,72                  |
|                                   | 1,5         | 33,0          | 0,133              | 5,72                  |
|                                   | 2,0         | 34,7          | 0,145              | 6,90                  |
|                                   | 2,5         | 37,0          | 0,242              | 13,11                 |
|                                   | 3,0         | <b>keine</b>  | <b>verwertbare</b> | <b>Kurve</b>          |
| <b>horizontal</b><br>(Richtung 2) | 1,0         | 30,5          | 0,123              | 4,50                  |
|                                   | 1,5         | 33,0          | 0,172              | 7,40                  |
|                                   | 2,0         | 34,6          | 0,242              | 11,41                 |
|                                   | 2,5         | 37,0          | 0,357              | 19,35                 |
|                                   | 3,0         | 39,0          | 0,287              | 17,22                 |

**Tabelle 4: Vibrationsverhalten bei vertikaler Erregung**

reichten Beschleunigungswerte liegen in einer Spanne von 10 bis 20 % der gemessenen vertikalen Beschleunigungen. Daraus wird ersichtlich, dass der erregende Kolbenschwinger von den „Nebenschwingungen“ nicht beeinflusst wird, obwohl ein geringer Teil der aufgewendeten Energiemenge für die horizontalen Bewegungen „verschwendet“ werden.

Bei den horizontal erregten Schwingungen wurden prinzipiell die gleichen Erfahrungen wie bei der vertikalen Erregung gemacht: Die Hauptschwingung in Erregungsrichtung dominiert die Frequenzen der Nebenschwingungen und deren Beschleunigungen erreichen ebenfalls ein Niveau von ca. 10 bis 20 % der Hauptschwingungsrichtung bei einer wiederum annähernden Phasenverschiebung von 180°.

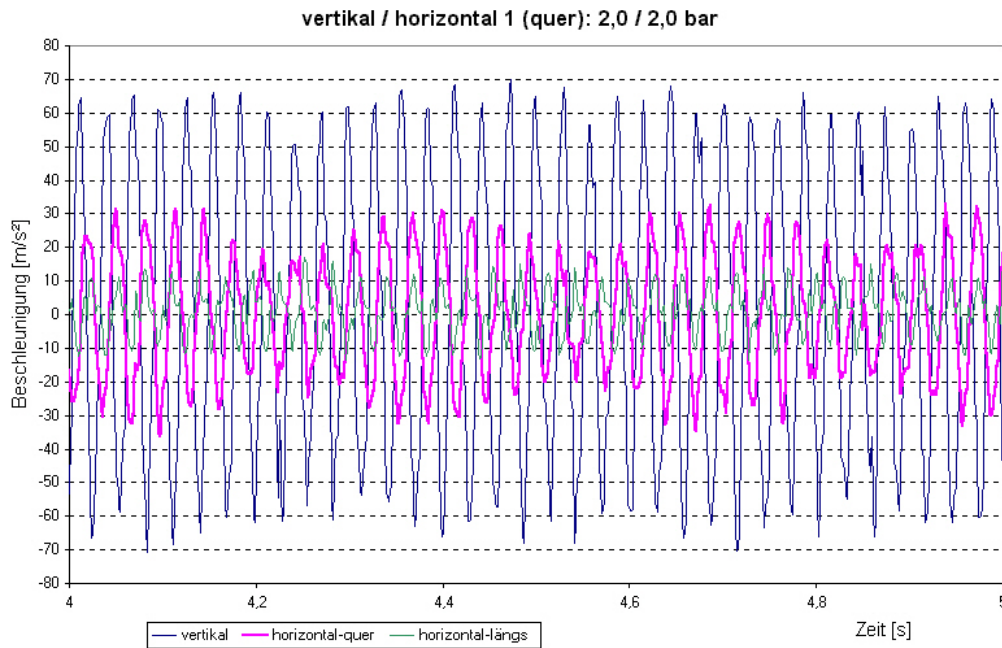
Die Auswertung der Schwingungen ausgewählter Kurven der zwei- und dreidimensionalen Erregungen in der **Tabelle 5** zeigt, dass sich die Frequenzen in den aktiven Schwingungsrichtungen von den erzielten Frequenzwerten, bei denen nur in einer Richtung vibriert wurde, kaum unterscheiden. Die Beschleunigungs- und Amplitudenmaxima, d. h., deren über einen gewissen Zeitraum gemittelten Werte, sind größer, weil ja zu den Werten der Haupterregung die der Nebenschwingungen hinzugefügt werden. Aber auf Grund der unterschiedlichen Erregerfrequenzen werden abwechselnd die „Nebenwerte“ addiert und an anderen Stellen subtrahiert, was zu den Erscheinungen führt, die allgemein als Schwebungen bezeichnet werden.

| Druck [bar]   | Frequenz [Hz] | Amplitude [mm] | Beschleunigung [m/s²] |              |     |
|---|---------------|----------------|-----------------------|--------------|-----|
| 1,0   | <u>30,6</u>   | 0,866          | 31,97                 | nur vertikal |     |
| 2,0   | 34,7          | 1,303          | 61,77                 |              |     |
| 3,0   | 39,0          | 1,639          | 98,24                 |              |     |
| zusätzliche horizontale Erregung 1 (quer) 2 (längs) |               |                |                       |              |     |
| 1,0   | <u>30,6</u>   | 0,888          | 32,78                 | 1,0          | 0,0 |
| 1,0   | <u>30,6</u>   | 0,875          | 32,30                 | 0,0          | 1,0 |
| 2,0   | 34,7          | 1,306          | 62,25                 | 2,0          | 0,0 |
| 2,0   | 34,7          | 1,367          | 65,15                 | 0,0          | 2,0 |
| 3,0   | 39,1          | 1,695          | 102,07                | 3,0          | 0,0 |
| 3,0   | 39,1          | 1,790          | 107,98                | 0,0          | 3,0 |
| 1,0   | <u>30,6</u>   | 0,929          | 34,29                 | 1,0          | 1,0 |
| 1,0   | <u>30,7</u>   | 1,027          | 38,25                 | 2,0          | 2,0 |
| 2,0   | 34,9          | 1,372          | 66,01                 | 2,0          | 2,0 |
| 2,0   | 35,0          | 1,511          | 73,06                 | 3,0          | 3,0 |

**Tabelle 5: Vibrationsverhalten bei kombinierter Erregung**

(Bild 79). In dem ausgewählten Beispiel ist insbesondere die hervorgehobene Schwebung in der horizontalen Richtung (1 – quer) deutlich als solche zu erkennen, obwohl auch in vertikaler Richtung eine diesbezügliche Tendenz sichtbar wird. Die Ursache der unterschiedlich star-





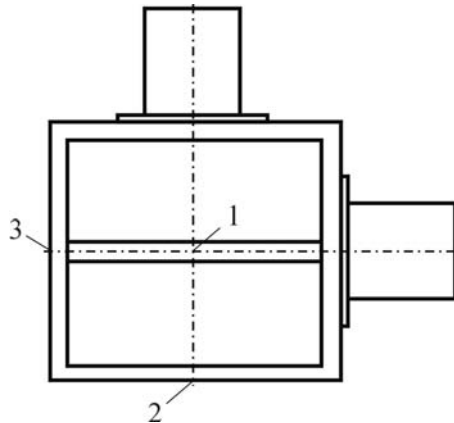
**Bild 79: „horizontale“ Schwebung**

ken Ausprägung der Schwebung ist darin begründet, dass in der Vertikalen höhere Beschleunigungen erreicht werden, aus denen wiederum größere Werte bei den Nebenschwingungen, die in etwa dem Niveau der grünen Kurve entsprechen, abgeleitet werden können, die sich dann wieder stärker auf den Kurvenverlauf in der Richtung horizontal 1 (quer) auswirken. Im Gegensatz dazu sind eben die Auswirkungen der von der horizontalen Erregung ausgehenden Nebenschwingungen wesentlich geringer, weil deren Hauptschwingung auch nur ca. 40 % vom Niveau der vertikalen Schwingung besitzt und somit ihre Nebenschwingungen ebenfalls niedriger sind. Auf dem gleichen Zusammenhang basiert die Lösung der Frage, von welcher aktiven Schwingung die Frequenz und die Beschleunigung/Amplitude der passiven (nicht erregten) Schwingungsrichtung letzt endlich bestimmt werden. Der Verlauf der grünen Kurve, horizontale Richtung 2 (längs), zeigt den gleichen Frequenzgang wie die vertikale Schwingung mit der bereits im Solobetrieb beobachteten Phasenverschiebung von ca. 180°. Der Einfluss der horizontalen Richtung 1 (quer) beschränkt sich auf die (geringe) Verschiebung der Amplituden, die auch bei dieser Kurve zu einer (ansatzweise sichtbaren) Schwebung führen.

#### 5.2.1.2. Versuche mit leerem Behälter

Für die Durchführung der Versuche *mit* Behälter war es erforderlich, den Beschleunigungsaufnehmer für die vertikalen Schwingungsmessungen anderweitig zu befestigen, d. h., den Messpunkt 1 um den Betrag der Behälterhöhe nach oben zu „verschieben“. Dazu wurde ein





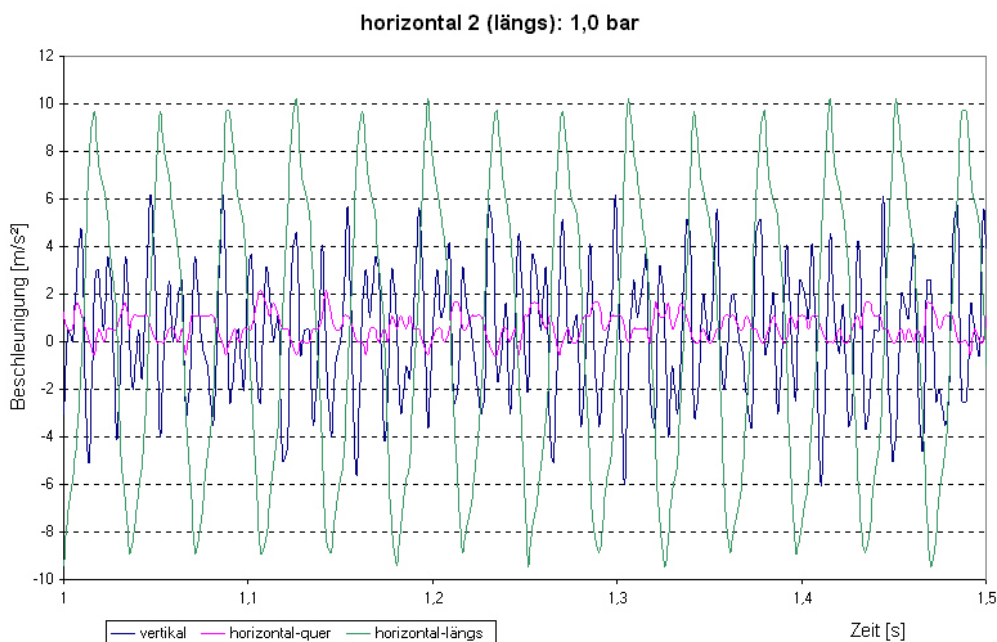
**Bild 80: Messpunkte mit Behälter**

Vierkanthohlprofil mit der Abmessung 20 x 20 auf der Oberkante des Behälters verschraubt und in der Mitte mit der für den Messpunkt notwendigen Gewindebohrung versehen. Wie in der Skizze im **Bild 80** zu sehen ist, wurden die beiden anderen Messpunkte auf ihren vorherigen Positionen belassen.

Wiederum als Erstes wurde das Verhalten des Schwingungssystems untersucht, wenn nur ein Vibrator in Betrieb genommen wird. Im dargestellten Beispiel (**Bild 81**) sind wieder neben den in Vibrations-

richtung (hier: horizontal **2** – längs) gemessenen Beschleunigungen auch in den beiden anderen Richtungen Schwingungen aufgenommen worden. Während sich die in der Richtung horizontal **1** – quer aufgenommene Kurve analog der unter **Pkt. 5.3.1.1. Versuche ohne Behälter** gemachten Beobachtungen verhält, d. h., die gleiche Frequenz wie die Erregervibration mit einer Phasenverschiebung von ca.  $180^\circ$  erreicht, scheint sich in vertikaler Richtung eine gewisse Eigendynamik zu entwickeln.

Die bei dieser horizontalen Erregung erzeugte vertikale Vibration besitzt scheinbar zu der ursächlichen Schwingung keine Beziehungen, da sich nahezu unabhängig von der eingestellten



**Bild 81: eindimensionale (horizontale) Erregung**

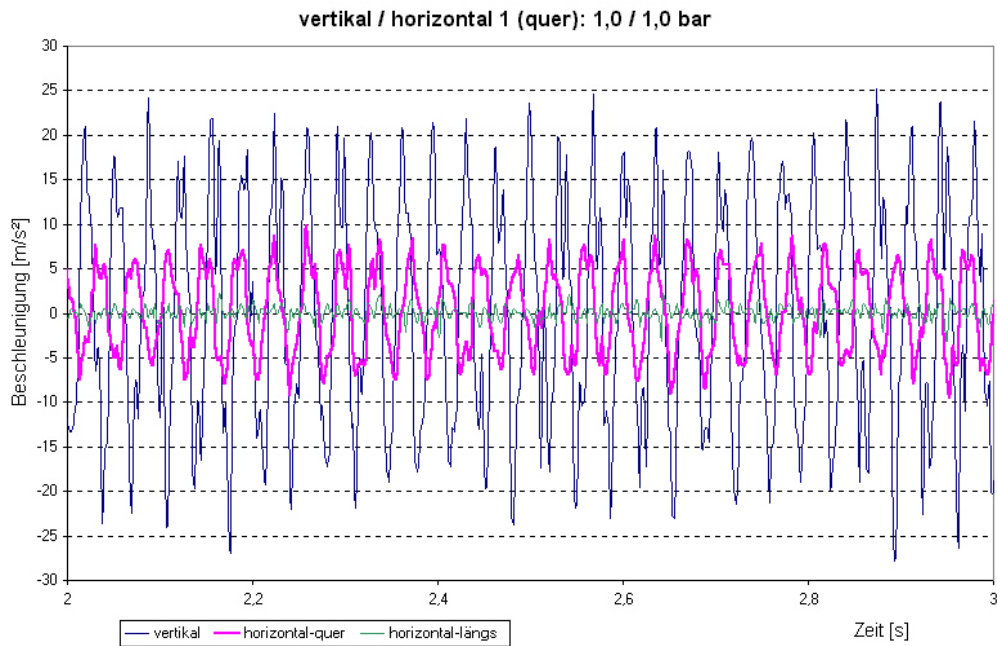
Regelgröße von 1,0 bis 2,5 bar eine Frequenz von ca. 75 bis 78 Hz und bei 3,0 bar 68 Hz einstellt. Wird jedoch in der Richtung horizontal **1** (quer) erregt, dann folgen die vertikalen Schwingungen im Allgemeinen wieder den Frequenzen der Erregerichtung, allerdings mit zum Teil starken Zwischenschwingungen und ohne (oder mit 360°?) Phasenverschiebung. Es kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass auf Grund der niedrigeren Amplitudenwerte die Grenzen der Auswertbarkeit hier schon tangiert wurden.

| Druck [bar]                      | Frequenz [Hz] | Amplitude [mm] | Beschleunigung [m/s²] |              |           |
|----------------------------------|---------------|----------------|-----------------------|--------------|-----------|
| 1,0                              | 29,4          | 0,565          | 19,29                 | nur vertikal |           |
| 2,0                              | <u>33,1</u>   | 0,973          | 42,14                 |              |           |
| 3,0                              | 37,1          | 1,390          | 75,62                 |              |           |
| zusätzliche horizontale Erregung |               |                |                       |              |           |
|                                  |               |                |                       | 1 (quer)     | 2 (längs) |
| 1,0                              | 29,2          | 0,621          | 20,89                 | 1,0          | 0,0       |
| 1,0                              | 29,2          | 0,614          | 20,67                 | 0,0          | 1,0       |
| 2,0                              | <u>33,2</u>   | 1,266          | 54,95                 | 2,0          | 0,0       |
| 2,0                              | <u>33,4</u>   | 1,282          | 56,45                 | 0,0          | 2,0       |
| 3,0                              | 37,1          | 1,517          | 82,37                 | 3,0          | 0,0       |
| 3,0                              | 36,9          | 1,413          | 76,11                 | 0,0          | 3,0       |
|                                  |               |                |                       |              |           |
| 1,0                              | 29,2          | 0,578          | 19,46                 | 1,0          | 1,0       |
| 1,0                              | 29,2          | 0,595          | 20,02                 | 2,0          | 2,0       |
| 2,0                              | <u>33,2</u>   | 1,286          | 56,10                 | 2,0          | 2,0       |
| 2,0                              | <u>33,3</u>   | 1,128          | 49,43                 | 3,0          | 3,0       |

**Tabelle 6: Vibrationsverhalten bei kombinierter Erregung**

Die nicht vorhandene (oder doppelte) 180°-Phasenverschiebung könnte aber auch mit der Messpunktverlagerung (MP **1**) zusammenhängen, da auch bei vertikaler Erregung die passiven horizontalen Schwingungen keine oder nur eine minimale Verschiebung aufweisen.

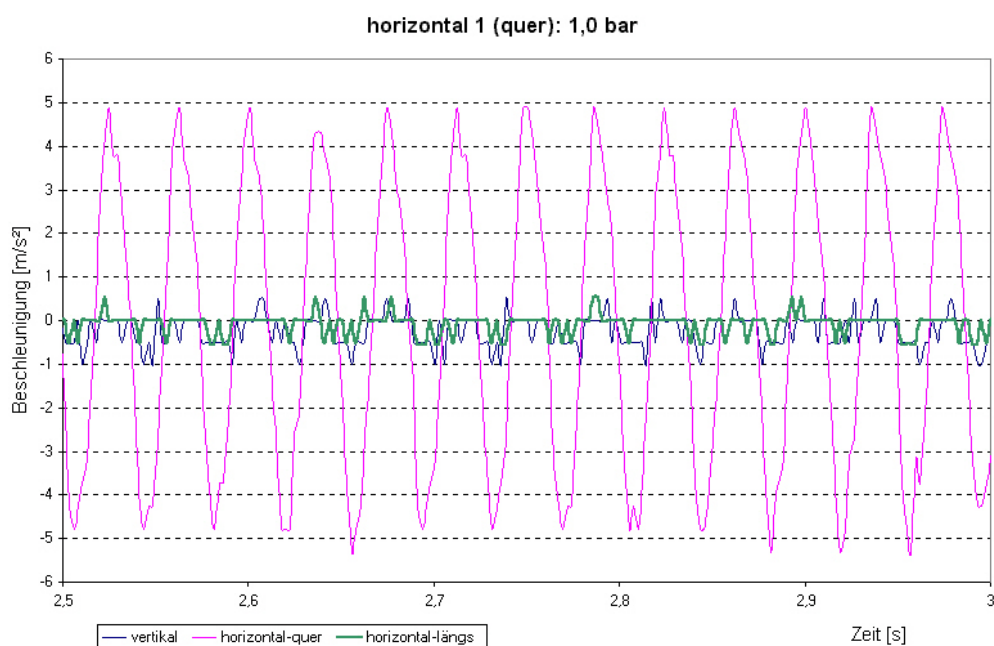
Wie in der **Tabelle 6** zu sehen ist, bestätigt die Auswertung der Schwingungen ausgewählter Kurven der zwei- und dreidimensionalen Erregungen wiederum die unter **Pkt. 5.3.1.1. Versuche ohne Behälter** erzielten Ergebnisse. Die Frequenzen in den aktiven Schwingungsrichtungen unterscheiden sich von den ermittelten Frequenzwerten, bei denen nur in einer Richtung vibriert wurde, ebenfalls kaum. Die dabei beobachteten Schwebungen sind auch hier mit leerem Behälter noch sichtbar, aber auf Grund der niedrigeren Amplituden- und Beschleunigungsmaxima nicht mehr so stark ausgeprägt (**Bild 82**). Die grüne Kurve belegt anschaulich, dass die passiven Schwingungsverläufe (hier: horizontal **2** – längs) auf Grund ihrer geringen Maxima nicht so ohne Weiteres und immer zweifelsfrei auswertbar sind.



**Bild 82: „horizontale“ Schwebung**

### 5.2.1.3. Versuche mit halb vollem Behälter

Begonnen wurden die Untersuchungen zum Schwingungsverhalten des mit Formstoff halb voll gefüllten Behälters wiederum mit den „Solo“-Versuchen. Am gewählten Beispiel (**Bild 83**) wird sichtbar, dass mit niedriger werdendem Niveau der Beschleunigungs- und Amplitudenmaxima der aktiven Schwingung die Nebenschwingungen weiter absinken und die dabei

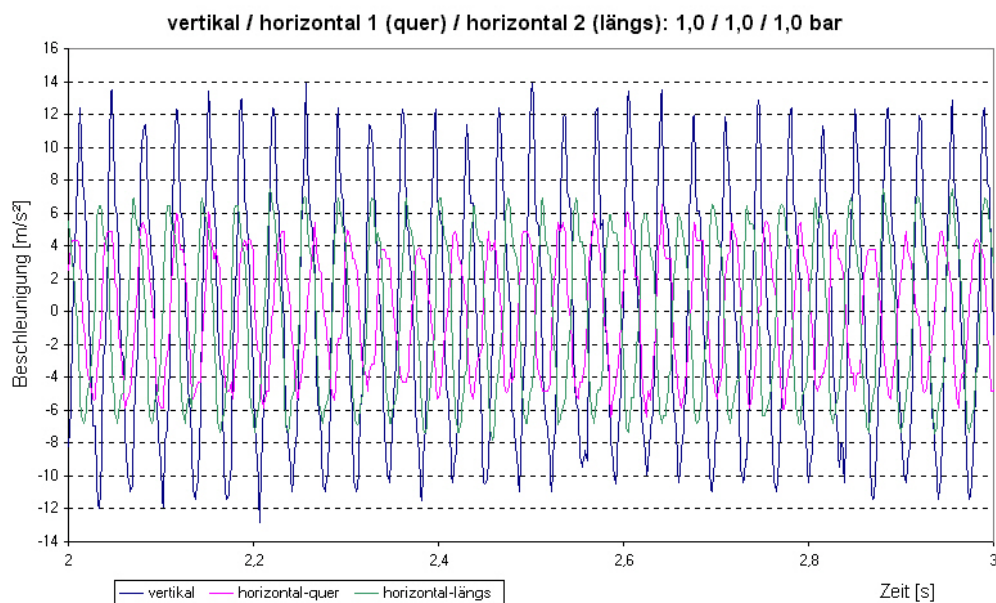


**Bild 83: eindimensionale (horizontale) Erregung**

auftretenden Zwischenausschläge zunehmen. Die unter **Pkt. 5.3.1.1. Versuche ohne Behälter** und **5.2.1.2. Versuche mit leerem Behälter** ermittelten (teilweisen) Phasenverschiebungen zwischen den aktiven und passiven Kurvenverläufen werden hier nicht mehr beobachtet. Die Schwierigkeiten mit der Auswertung der Passiv-Kurvenverläufe nehmen weiter zu, jedoch eine Tendenz zu einer Eigendynamik, die teilweise bei den vertikalen Passiv-Schwingungen unter **Pkt. 5.2.1.2. Versuche mit leerem Behälter** festgestellt wurde, kann hier nicht abgeleitet werden.

| Druck [bar] | Frequenz [Hz] | Amplitude [mm] | Beschleunigung [m/s²] |   |           |
|-------------|---------------|----------------|-----------------------|---|-----------|
| 1,0         | <u>28,7</u>   | 0,359          | 11,66                 | <i>nur vertikal</i>                     |           |
| 2,0         | 33,4          | 0,904          | 39,78                 |   |           |
| 3,0         | 37,0          | 1,190          | 64,41                 |   |           |
|             |               |                |                       |   |           |
|             |               |                |                       | <i>zusätzliche horizontale Erregung</i> |           |
|             |               |                |                       | 1 (quer)                                | 2 (längs) |
| 1,0         | <u>28,7</u>   | 0,350          | 11,36                 | 1,0                                     | 0,0       |
| 1,0         | <u>28,7</u>   | 0,364          | 11,83                 | 0,0                                     | 1,0       |
| 2,0         | 33,3          | 0,802          | 35,15                 | 2,0                                     | 0,0       |
| 2,0         | 33,3          | 0,895          | 39,23                 | 0,0                                     | 2,0       |
| 3,0         | 36,9          | 1,071          | 57,41                 | 3,0                                     | 0,0       |
| 3,0         | 37,0          | 1,131          | 61,22                 | 0,0                                     | 3,0       |
|             |               |                |                       |   |           |
| 1,0         | <u>28,7</u>   | 0,364          | 11,85                 | 1,0                                     | 1,0       |
| 1,0         | <u>28,8</u>   | 0,366          | 11,93                 | 2,0                                     | 2,0       |
| 2,0         | 33,2          | 0,856          | 37,17                 | 2,0                                     | 2,0       |
| 2,0         | 33,0          | 0,821          | 35,40                 | 3,0                                     | 3,0       |

**Tabelle 7: Vibrationsverhalten bei kombinierter Erregung**

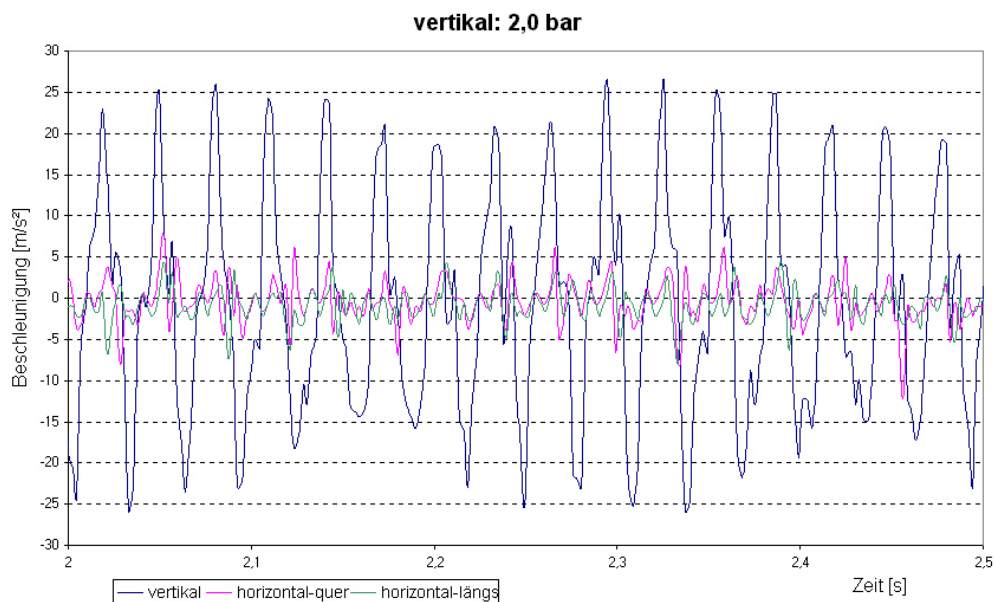


**Bild 84: 3-D-Schwebung**

Und wieder bestätigen die Werte in der **Tabelle 7** bei der Auswertung der Kurven der zwei- und dreidimensionalen Erregungen die Aussage, dass sich die Frequenzen in den aktiven Schwingungsrichtungen von den erzielten Frequenzwerten, bei denen nur in einer Richtung vibriert wurde, kaum unterscheiden. Und obwohl die Beschleunigungs- und Amplitudenmaxima niedriger als beim **Versuch mit leerem Behälter (Pkt. 5.3.1.2.)** sind, werden wieder Schwebungen beobachtet, die auch in der dreidimensionalen Erregung (**Bild 84**) deutlich erkennbar sind, wobei deren Intensitäten in den horizontalen Richtungen stärker ausgeprägt sind als die in vertikaler Richtung.

#### 5.2.1.4. Versuche mit vollem Behälter

Wiederum wurde für die Beurteilung des Schwingungssystems bei vollem Behälter das Verhalten im „Solo-Betrieb“ als Ausgangsbasis benutzt. Und hier zeigt es sich, dass der Formstoff auf die Ausbildung der Schwebungen doch einen Einfluss zu haben scheint, denn sie treten bereits ohne eine zusätzliche horizontale Erregung auf (**Bild 85**). Dieses Verhalten deutete sich bereits bei halb vollem Behälter an, war aber nicht zweifelsfrei als Schwebung zu erkennen. Diese Schwebungen aber weisen darauf hin, dass sich der Sand im Behälter zwar von außen zu Schwingungen anregen lässt, die jedoch nicht deshalb auch zwangsläufig synchron mit dem Behälterschwingungen verlaufen (müssen).



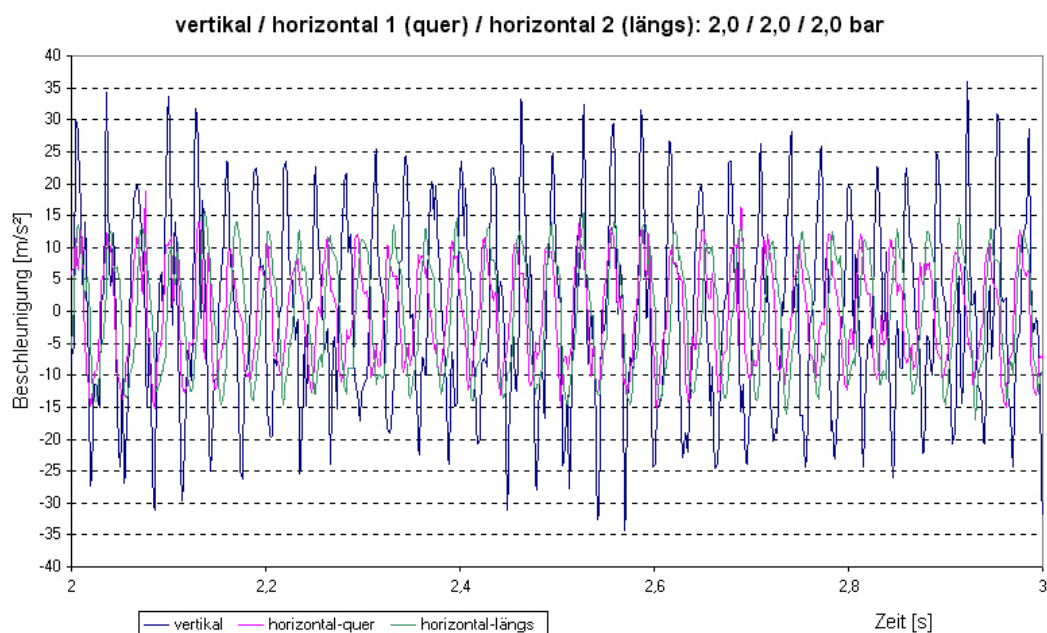
**Bild 85: eindimensionale vertikale Erregung**

In der Literatur /11/ ist bei den Ausführungen zum Phänomen „Vibrokothen“, das bei Beschleunigungen von mehr als 1 g stattfindet, dargestellt worden, dass sich der Sand nach

Durchlaufen der maximalen Tischbeschleunigung vom Behälterboden löst und sich bei der Abwärtsbewegung des Behälters ein Spalt zwischen dem Behälterboden und dem Sand bildet. Der Sand bewegt sich im Raum nach den Gesetzen des freien vertikalen Wurfs und wird in der anschließenden Stoßphase wieder auf den Wert der Behältergeschwindigkeit beschleunigt. Nach dieser Darstellung wird der Sand jeweils in der Aufwärtsbewegung des Tisches mitgenommen, d. h., der Tisch und der Formstoff schwingen mit der gleichen Frequenz, was also bedeutet, dass die Ursache für die Schwebung in einer Amplitudenmodulation zu suchen sind.

| Druck [bar]                      | Frequenz [Hz] | Amplitude [mm] | Beschleunigung [m/s²] |              |           |
|----------------------------------|---------------|----------------|-----------------------|--------------|-----------|
| 1,0                              | 28,4          | 0,270          | 8,61                  | nur vertikal |           |
| 2,0                              | <u>32,7</u>   | 0,525          | 22,17                 |              |           |
| 3,0                              | 36,3          | 0,791          | 41,26                 |              |           |
| zusätzliche horizontale Erregung |               |                |                       |              |           |
|                                  |               |                |                       | 1 (quer)     | 2 (längs) |
| 1,0                              | 28,3          | 0,276          | 8,76                  | 1,0          | 0,0       |
| 1,0                              | 28,3          | 0,278          | 8,80                  | 0,0          | 1,0       |
| 2,0                              | <u>32,6</u>   | 0,562          | 23,59                 | 2,0          | 0,0       |
| 2,0                              | <u>32,6</u>   | 0,581          | 24,39                 | 0,0          | 2,0       |
| 3,0                              | 36,4          | 0,808          | 42,33                 | 3,0          | 0,0       |
| 3,0                              | 36,6          | 0,840          | 44,44                 | 0,0          | 3,0       |
|                                  |               |                |                       |              |           |
| 1,0                              | 28,4          | 0,274          | 8,71                  | 1,0          | 1,0       |
| 1,0                              | 28,3          | 0,289          | 9,16                  | 2,0          | 2,0       |
| 2,0                              | <u>33,0</u>   | 0,590          | 25,34                 | 2,0          | 2,0       |
| 2,0                              | <u>32,6</u>   | 0,594          | 24,94                 | 3,0          | 3,0       |

**Tabelle 8: Vibrationsverhalten bei kombinierter Erregung**



**Bild 86: 3-D-Schwebung**

Der **Tabelle 8** kann wiederum die nun schon erwartete Aussage entnommen werden, dass sich die Frequenzen in den aktiven Schwingungsrichtungen von den erzielten Frequenzwerten, bei denen nur in einer Richtung vibriert wurde, kaum unterscheiden. Die Beschleunigungs- und Amplitudenmaxima sind wieder niedriger als beim **Versuch mit halb vollem Behälter (Pkt. 5.2.1.3.)**, dennoch werden auch bei der dreidimensionalen Erregung Schwebungen beobachtet, die GröÖte in vertikaler Richtung (**Bild 86**). Damit wird die im Zusammenhang mit der Auswertung des **Bildes 85** getroffene Aussage bestätigt.

#### 5.2.1.5. Ermittelte Erregerfrequenzen

Neben den noch zu bewertenden Vorzügen haben die für die Durchführung der Vibrationsversuche benutzten Kolbenschwinger einen Nachteil, dass die gewünschte Frequenz nur über die Einstellung eines Erregerdruckes realisiert werden kann. Für die Zuordnung der Frequenzen zu den jeweils eingestellten Drücken wurden die vorangegangenen Versuche (**Pkt. 5.2.1.1. bis 5.2.1.4.**) durchgeführt. Erwartungsgemäß zeigte es sich, dass bei gleicher eingestellter Regelgröße (z. B.: 1,0 bar) mit der Massezunahme nicht nur die Beschleunigung abnahm, sondern auch die gemessene Frequenz. Aber diese Abnahmen lassen sich nicht einfach so aus den Massezunahmen über die vereinfachende Beziehung Kraft ist (gleich) Masse mal Beschleunigung im Voraus bestimmen, da hier sowohl die Kraft als auch die Beschleunigung und deren Wirkungen auf die bewegte Masse jeweils als zeitlich veränderliche Komponenten in Erscheinung treten. Die Krafteinleitung erfolgt durch die Kolbenschwinger in Form einer erzwungenen Schwingung, somit gilt für die Zeit abhängige Kraft  $F(t) = F_{\max} * \sin(\Omega * t)$  (16) /61–63/ mit einer Maximalkraft  $F_{\max}$  und der Erregerkreisfrequenz.  $\Omega$ , die sich aus  $\Omega = 2 * \pi * f_E$  (17) /61–63/ mit der Erregerfrequenz  $f_E$  berechnet. Auf der „Masse–Beschleunigungs“-Seite der Gleichung existiert zum Einen das Produkt aus Masse mal Beschleunigung, deren Zeitabhängigkeit in den gezeigten Diagrammen (**Bilder 76, 78 ff**) deutlich sichtbar ist und die als 2. Ableitung des Weges  $x$  nach der Zeit Eingang in diesen Formelteil ( $m * x''(t)$ ) findet. Zum Anderen gilt bei erzwungenen (realen) Schwingungen, dass zur Formel auch ein Dämpfungsglied gehört, das sich aus  $b * x'(t)$  berechnet, wobei  $b$  ein den Dämpfungsgrad enthaltender Faktor /61–63/ und  $x'(t)$  die Geschwindigkeit, die 1. Ableitung des Weges  $x$  nach der Zeit, ist. Des weiteren muss bei jeder Bewegung eines schwingenden Masse–Feder–Systems die Rückstellkraft der Feder(n) überwunden werden /61–63/, deren Anteil sich aus dem, mit der Federkonstanten  $c$  multipliziertem, Zeit abhängigem Weg  $x$  berechnet.

Zusammen gefasst ergibt das diese Formel:

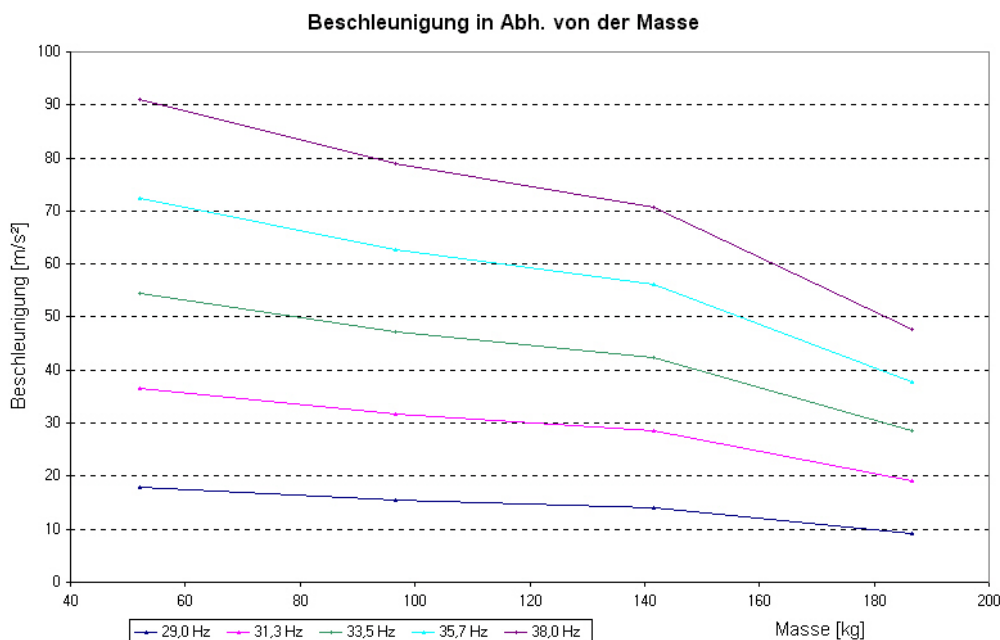


$$F_{\max} \cdot \sin(\Omega \cdot t) = m \cdot x''(t) + b \cdot x'(t) + c \cdot x(t) \quad (18) \text{ /61–63/}$$

mit der die erzwungenen harmonischen Schwingungen ausreichend beschrieben werden können.

Die Formel (18) ist streng genommen die Bewegungsgleichung einer linearen, harmonischen Schwingung, wird aber hier zur Beschreibung einer 3-D-Bewegung benutzt? Die Erklärung dafür lautet, da ja die aktiven Schwingungserregungen sich kaum gegenseitig beeinflussen, wie die unter **Pkt. 5.2.1.1. bis 5.2.1.4.** dargelegten Versuchsergebnisse beweisen, kann diese räumliche Bewegung nahezu problemlos in die drei Elementarvibrationsrichtungen (vertikal, horizontal **1**, horizontal **2**) zerlegt werden. Und diese Vibrationsrichtungen sind, jede für sich betrachtet, wieder lineare, harmonische Schwingungen.

Im **Bild 87** ist die Masseabhängigkeit der erzielbaren Beschleunigungen dargestellt. Um diese Abhängigkeit in der Form so darstellen zu können, wurden in die Beschleunigung–Frequenz–Kurven die zugehörigen Trendlinien gelegt und mit deren Hilfe die der normierten Frequenz (z. B. 31,3 Hz) entsprechende Beschleunigung zugeordnet.



**Bild 87: Masse abhängige Beschleunigung**

Dass sich die jeweils in senkrechter Richtung zueinander vibrierenden Kolbenschwinger nicht gegenseitig aus dem Takt bringen, ist im Wesentlichen mit dem Aufbau und der prinzipiellen Wirkungsweise des Schwingers begründet. Der Kolben schwingt in einem Druck dichtem Ge-

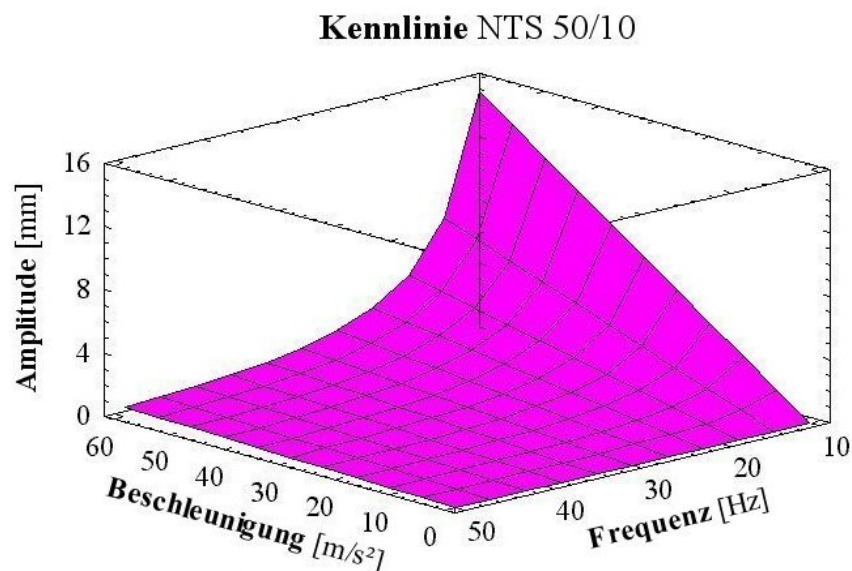


häuse frei zwischen zwei Endpunkten in senkrechter Richtung zu seiner Befestigungsfläche, und die sich einstellende Frequenz wird über den Druck als Regelgröße gesteuert. Die bei den Soloversuchen aufgedeckten Nebenschwingungen bringen nachgewiesener Maßen die Hauptschwingungen nicht aus dem Takt, sondern beeinflussen „nur“ die Beschleunigungs- und Amplitudenmaxima und sind somit auch an der Ausbildung der beobachteten Schwebungen beteiligt. Demgegenüber besitzt die in Bewegung zu versetzende Masse einen nicht zu negierenden Einfluss auf die sich einstellende Frequenz.

| Druck p [bar]<br>(Regelgröße) | Frequenz f [Hz] |              |              |
|-------------------------------|-----------------|--------------|--------------|
|                               | vertikal        | horizontal 1 | horizontal 2 |
| 1,0                           | 28,4            | 26,6         | 27,0         |
| 1,5                           | 30,7            | 28,5         | 29,0         |
| 2,0                           | 32,7            | 30,5         | 30,9         |
| 2,5                           | 34,6            | 32,4         | 33,0         |
| 3,0                           | 36,3            | 34,6         | 34,9         |

**Tabelle 9: Druck–Frequenz–Zuordnung**

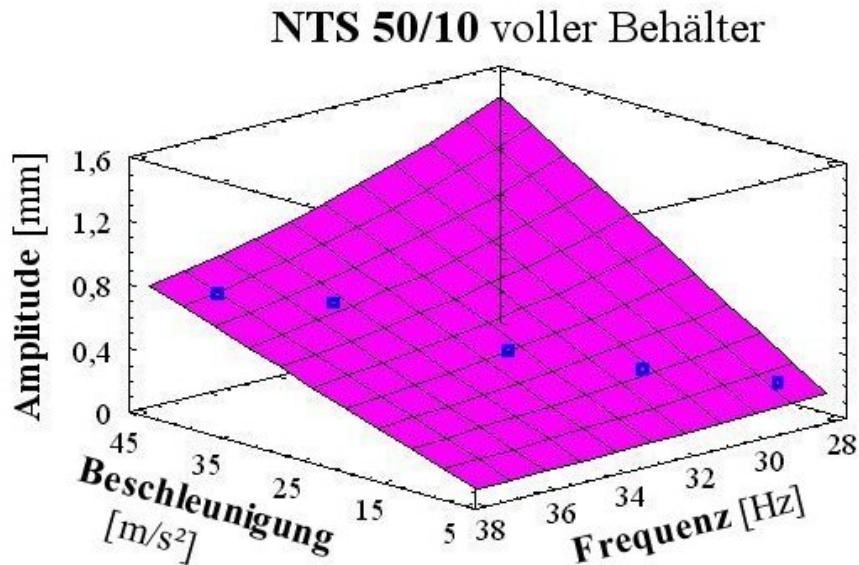
Für die Durchführung der Verdichtungsversuche werden die bei vollem Behälter ermittelten Druck–Frequenz–Zuordnungen benutzt (**Tabelle 9**).



**Bild 88: vertikaler Vibrator**

Das Diagramm **Bild 88** zeigt in der Kennlinie für den als Beispiel ausgewählten vertikalen Kolbenschwinger vom Typ NTS 50/10 den typischen asymptotischen Kurvenverlauf der

Beziehung  $b_{\max} = a_{\max} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 (1) - \text{Bild 8}$ , wobei hier die Achsen aus Ansichtsgründen so gedreht wurden, dass der Zusammenhang zu **Bild 89**, der den die Messwerte präsentierenden Ausschnitt zeigt, deutlicher wird.



**Bild 89: Kennlinie – Messwertausschnitt**

Da die horizontalen Vibratoren (NTS 50/04) sich in ihrem Kennlinienverlauf nicht wesentlich von dem des vertikalen Vibrators unterscheiden, wurde auf deren Darstellung verzichtet.

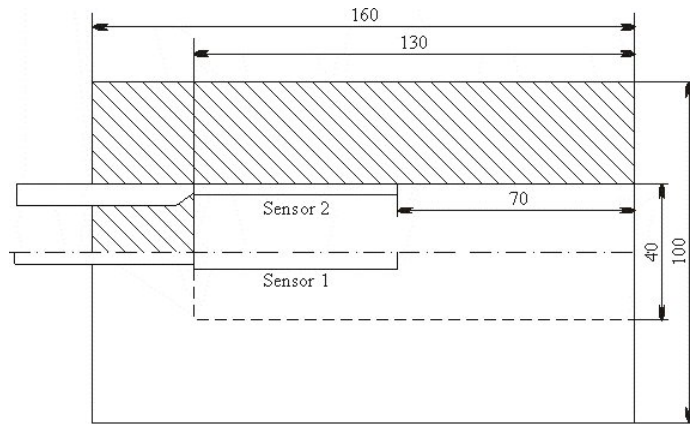
### 5.3. Verdichtungsversuche

Für eine systematische Erforschung des Füll- und Verdichtungsverhaltens von Hohlräumen und Hinterschneidungen ist es wichtig zu untersuchen, welchen Einfluss die Lage/Hauptorientierung des Hohlraumes (waagerechte oder senkrechte Vorzugsrichtung) auf das Befüllen und Verdichten hat.

Das für die Versuche verwendete Modell wurde so gestaltet, dass es sowohl für die waagerechte als auch senkrechte Einformlage verwendet werden konnte. Um eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mögliche Modellverformung auf Grund auftretender starker Sandströmungen zu garantieren, wurde als Ausgangsmaterial eine 3 cm starke Styroporplatte verwendet. Der zu befüllende Hohlraum sollte möglichst eine einfache quaderförmige Geometrie besitzen, um die für derartige grundsätzliche Untersuchungen erforderliche Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse zu erleichtern. Für die Messung des Füll- und Verdichtungsverhaltens im Hohlraum wurde der Sensor 2 an eine Innenfläche des Hohlraumendes be-

festigt, die weiteren Details zum Modell etc. werden nachfolgend erläutert.

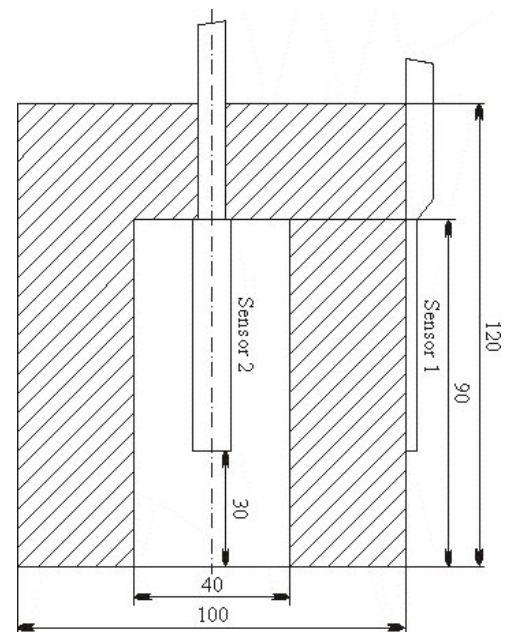
### 5.3.1. Modelleinformung



**Bild 90: Waagerechte Einformlage**

Verdichtungsverhaltens im Modellhohlraum) zu verdeutlichen. Die nicht angeführten Modellbreite bzw. Hohlraumbreite betragen 100 bzw. 40 mm. Für die Durchführung der Versuche in der waagerechten Einformlage wurde die Hohlraumlängsachse des Modells stets in Richtung des horizontal längs schwingenden Vibrators, bisher als Richtung horizontal **2** bezeichnet, ausgerichtet.

Im **Bild 91** ist die Befestigung des äußeren Sensors (**1**), mit dem das Einform- und Verdichtungsverhalten direkt am Modell zu Vergleichszwecken gemessen wird, noch mal deutlicher dargestellt. Des weiteren kann dieser Darstellung entnommen werden, dass das Modell für die Durchführung der Versuche in der senkrechten Einformlage im Vergleich zur waagerechten Lage um 4 cm gekürzt wurde. Denn anhand von durchgeführten Vorversuchen hat es sich gezeigt, dass ein Hohlraum von 130 mm Länge entgegen der Schwerkraft auch bei einer vollen Ausreizung der Leistungsfähigkeit des vorhandenen Vibrators nicht mit Sand auszufüllen ist.



**Bild 91: senkrechte Einformlage**

### 5.3.2. Vorversuche

Wie bereits unter **Pkt. 5. 3-D-Vibration** angedeutet wurde, bestand die Zielstellung der durchzuführenden Untersuchungen darin, die Abhängigkeiten und wechselseitigen Beeinflussungen bei einer dreidimensionalen Vibration zu ermitteln. Dazu mussten die Erregerdrücke und die Einformhöhe variiert werden, als Abstufung waren bei den Drücken eine 0,5 bar-Stufung von 1,0 bis 3,0 bar und bei der Höhe eine 5 cm-Stufung von 15 bis 35 cm vorgesehen. Das bedeutete bei den vier Variablen eine jeweilige Varianz von 5 Stufen, d. h., es hätten pro Einformlage  $5^4 = 625$  Einform- und Verdichtungsversuche durchgeführt werden müssen. Dazu kämen dann noch mögliche Vergleichsversuche mit zwei- oder eindimensionalen Erregungen (ein oder zwei Vibratoren mit 0 bar-Einstellung). Neben der ausufernden Versuchszahl würde damit auch der Überblick verloren gehen und eine systematische Auswertung der erzielten Ergebnisse in Frage gestellt.

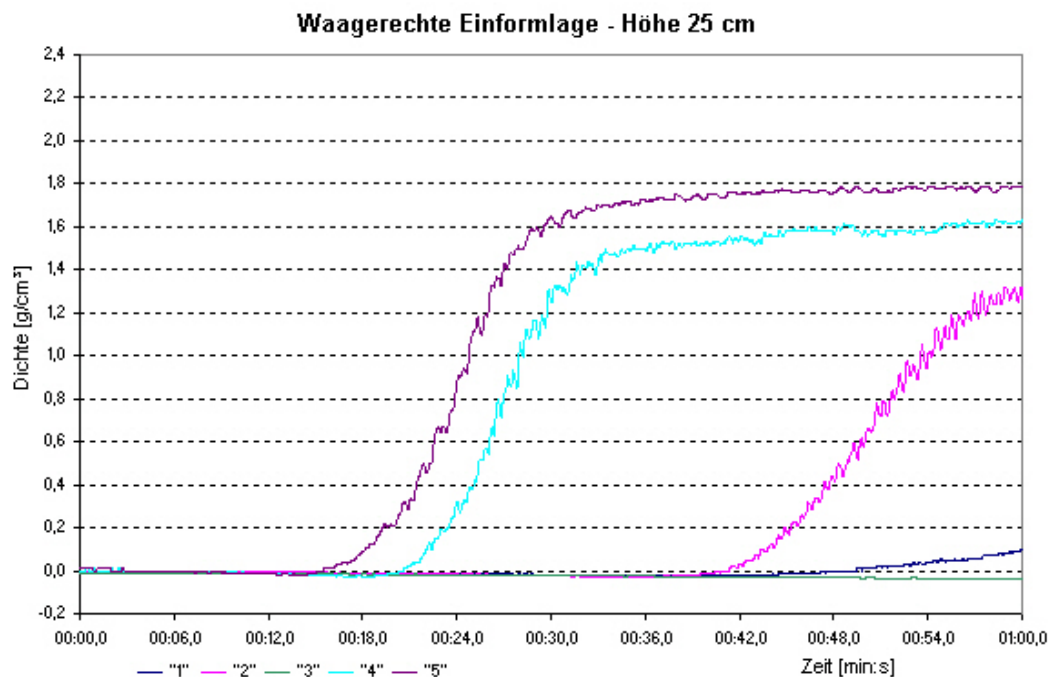
Eine derartige Problemstellung, einer Vielzahl möglicher Versuchsvarianten steht eine nur im begrenztem Umfang durchführbare Anzahl von Versuchen gegenüber, „ruft“ förmlich nach einer Anwendung mathematisch-statistischer Versuchsmethoden. Grundlage dafür sind wohlüberlegt auf der Basis von Vorversuchen ausgewählte Versuchsniveaus, die in festzulegenden Grenzen variiert und miteinander kombiniert werden.

#### 5.3.2.1. Waagerechte Einformlage

Unter der Maßgabe, solche möglichst optimale Hauptniveaus für die Anwendung mathematisch-statistischer Versuchsmethoden zu finden, wurden die Versuche Schwerpunkt mäßig mit der Einformhöhe 25 cm, flankiert von einigen Versuchen mit den Höhen 15 und 35 cm, durchgeführt. Denn aus der Literatur /11/ ist hinreichend bekannt, dass die besten Verdichtungsergebnisse in einem Bereich von 20 bis 30 cm Einformhöhe erzielt werden. Als Höhe wurde für alle Versuche der Abstand der Modelloberkante zur Behälteroberkante definiert.

Um die sich abzeichnenden Tendenzen zu verdeutlichen, wurden ausgewählte Füll- und Verdichtungskurven in einem Diagramm (**Bild 92**) zusammen gefasst. Obwohl die Erregung durch die Vibratoren – in Querrichtung mit 1,5 bar (28,5 Hz), in Längsrichtung mit 1,0 bar (27,0 Hz) und vertikal 1,5 bar (30,7 Hz) – nur einen geringen Erfolg zeigte, liefert aber der Anstieg der Kurve **1** das Argument dafür, dass niedrigere Drücke (Frequenzen) für eine erfolgreiche Hohlraumbefüllung nicht sinnvoll sind. Die indirekte Bestätigung dazu lieferte gleich die Kurve **2**, bei der die Quererregung auf 3,0 bar (34,6 Hz) und die Längserregung auf

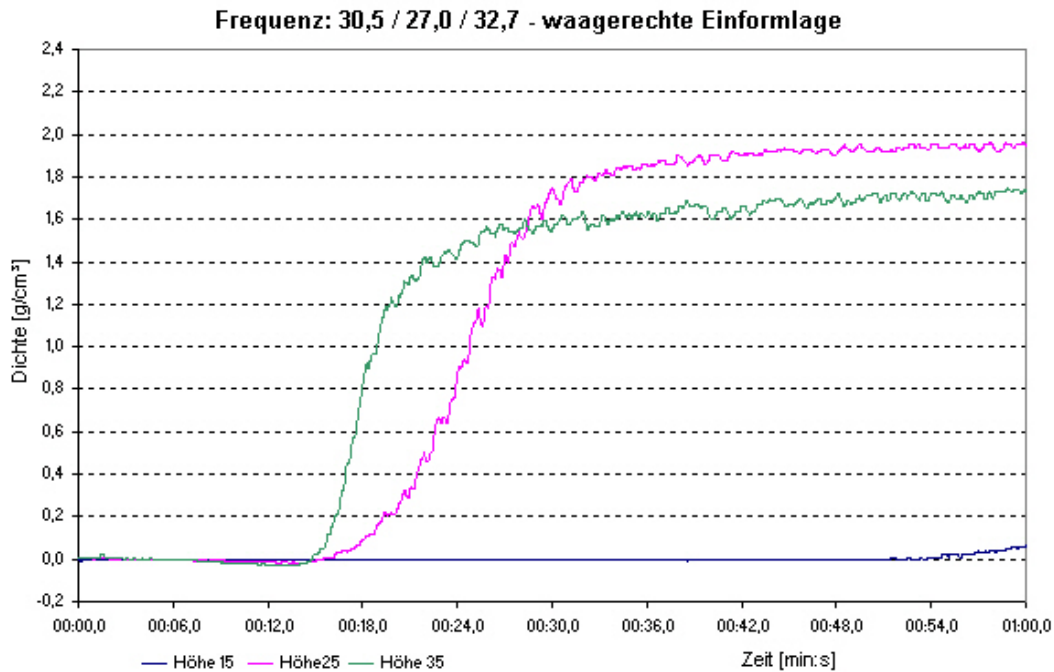
1,5 bar (29,0 Hz) erhöht wurde, der Kurvenanstieg beginnt nach ca. 40 s Vibrationsdauer und bei 60 s wird ein Dichtewert von etwa  $1,3 \text{ g/cm}^3$  erreicht. Anders verhält es sich, wenn die Er-



**Bild 92: Hohlraumbefüllung bei variablen Frequenzen**

regung nur in Richtung der Hohlraumlängsachse gesteigert wird. Wie der Verlauf der Kurve **3** zeigt, ist selbst die Erhöhung der Längserregung auf 3,0 bar (34,9 Hz) nicht ausreichend, um hier einen Anstieg zu bewirken. Hingegen steigt die Kurve **4** bereits nach ca. 20 s an, um nach 60 s ca.  $1,6 \text{ g/cm}^3$  zu erreichen; bewirkt durch die Erhöhung der vertikalen Erregung auf 2,0 bar (32,7 Hz). Den größten Anstieg der ausgewählten Kurven weist Nummer **5** auf, er beginnt bereits bei ca. 15 s und der erreichte Dichtewert beträgt nach 60 s ca.  $1,8 \text{ g/cm}^3$ . Hier wurden sowohl die Quererregung als auch die vertikale Erregung auf 2,0 bar (30,5 bzw. 32,7 Hz) erhöht.

Fasst man nun die sich abzeichnenden Trends zusammen, ohne die eventuellen sich bei der horizontalen, in Richtung der Hohlraumlängsachse, Erregung abzeichnenden Besonderheiten überzubewerten, so ergibt sich folgendes Bild: In horizontaler Richtung ist ein Erregerdruck von etwa 3,0 bar (34,6 bzw. 34,9 Hz) nötig, um bei der Hohlraumbefüllung sichtbare Ergebnisse zu erzielen, während bei der vertikalen Erregung dazu schon 2,0 bar (32,7 Hz) ausreichend sind. Darauf hin wurde auf der Basis der Regelgröße Druck als Kompromiss der Wert 2,5 bar als Hauptniveau für die Erregungsvariablen festgelegt.



**Bild 93: Hohlräumbefüllung bei variabler Einformhöhe**

Im **Bild 93** ist das Befüllen des Hohlraumes in unterschiedlichen Einformhöhen bei ansonsten gleichen Erregerdrücken bzw. –frequenzen dargestellt. Während bei einer Höhe von 15 cm nur ein leichter Anstieg bei 60 s Vibrationsdauer festzustellen ist, steigt die 25 cm–Kurve bereits nach 15 s an (entspricht der Kurve 5 im **Bild 92**) und bei 35 cm Einformhöhe ist der Kurvenanstieg steiler, aber nach 60 s werden „nur“ ca. 1,6 g/cm<sup>3</sup> erreicht.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurde für die Höhe 25 cm als Hauptniveau festgelegt.

### 5.3.2.2. Senkrechte Einformlage

Bei der Durchführung der Vorversuche in dieser Einformlage stellte es sich heraus, dass die Schwerkraft nicht so ohne weiteres zu überwinden ist. Selbst bei der Verwendung der gleichen Erregerdrücke (–frequenzen), die in der waagerechten Lage gute Dichtewerte erzielten, zeigte sich bei der angestrebten Hohlräumbefüllung keine Reaktion. Um die Befüllbarkeit in der senkrechten Lage generell zu testen, wurde noch ein Langzeitversuch mit wechselnden Drücken (Frequenzen) durchgeführt. Die Vibration in Richtung der Hohlraumlängsachse erwies sich bei der waagerechten Einformlage nicht als begünstigend hinsichtlich der Zielstellung, weshalb der Versuch nur mit den beiden horizontalen Vibratoren gestartet wurde. Zuerst wurden jeweils 1,0 bar (26,6 bzw. 27,0 Hz) eingestellt, die dann nach 50 s auf 1,5 bar (28,5 bzw. 29,0 Hz) hochgeregelt wurden, in weiteren 50 s–Schritten erfolgte die Einstellung der



beiden Vibratoren auf 2,0 bar (30,5 bzw. 30,9 Hz) und danach auf 2,5 bar (32,4 bzw. 33,0 Hz), aber es zeigte sich keine Reaktion. Auch die Hinzunahme der vertikalen Erregung mit 2,0 bar (32,7 Hz) nach weiteren 35 s brachte nichts, erst die weitere Erhöhung der horizontalen Erregerdrücke auf jeweils 3,0 bar (34,6 bzw. 34,9 Hz) nach insgesamt 235 s führte nach ca. 20 s zu einem Dichtewert von etwa 0,3 g/cm<sup>3</sup>.

Um nun die Versuche in der senkrechten Einformlage mit den gleichen Parametern wie die in waagerechter Lage durchführen zu können und dennoch möglichst gute Ergebnisse zu erzielen, war es unumgänglich geworden, das Modell dafür in seiner Hohlraumlänge zu reduzieren. Es wurde entschieden, die Länge des Hohlraumes auf 90 mm zu kürzen, da mit einem gleichartigen Modell ebenfalls in senkrechter Einformlage (**Bild 56**) bei Industrierversuchen (**Pkt. 4.3. Betriebliche Untersuchungen**) auswertbare Ergebnisse erzielt wurden.

### 5.3.3. Statistische Versuchsplanung und -durchführung

Diese mathematisch–statistische Methode nach dem Typ **2<sup>n</sup>** ist immer wieder eine praktikable Lösung für derartige Problemstellungen, wobei die Zahl „**2<sup>n</sup>**“ bedeutet, dass die verwendeten Variablen zwei verschiedene Werte, transformiert entweder den Wert **+1,0** oder **–1,0** ausgehend von einem Hauptniveau, annehmen können. Das bedeutet bei vier Variablen (s. auch **Pkt. 5.3.2. Vorversuche**) **2<sup>4</sup> = 16** verschiedene Versuchsmöglichkeiten, die für den gewählten Versuchsplan im Anschluss an die durchgeführten Vorversuche festgelegten Hauptniveaus und Versuchsparameter sind noch einmal in der **Tabelle 10** zusammen gefasst.

| Faktor                              | Frequenz f [Hz] |                |                | Einformhöhe [cm] |
|-------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
|                                     | horizontal 1    | horizontal 2   | vertikal       |                  |
| Transformation                      | x <sub>1</sub>  | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub>   |
| Hauptniveau                         | 32,4            | 33,0           | 34,6           | 25               |
| unteres Niveau<br>transformiert: -1 | 30,5            | 30,9           | 32,7           | 20               |
| oberes Niveau<br>transformiert: +1  | 34,6            | 34,9           | 36,3           | 30               |

**Tabelle 10: Versuchsparameter**

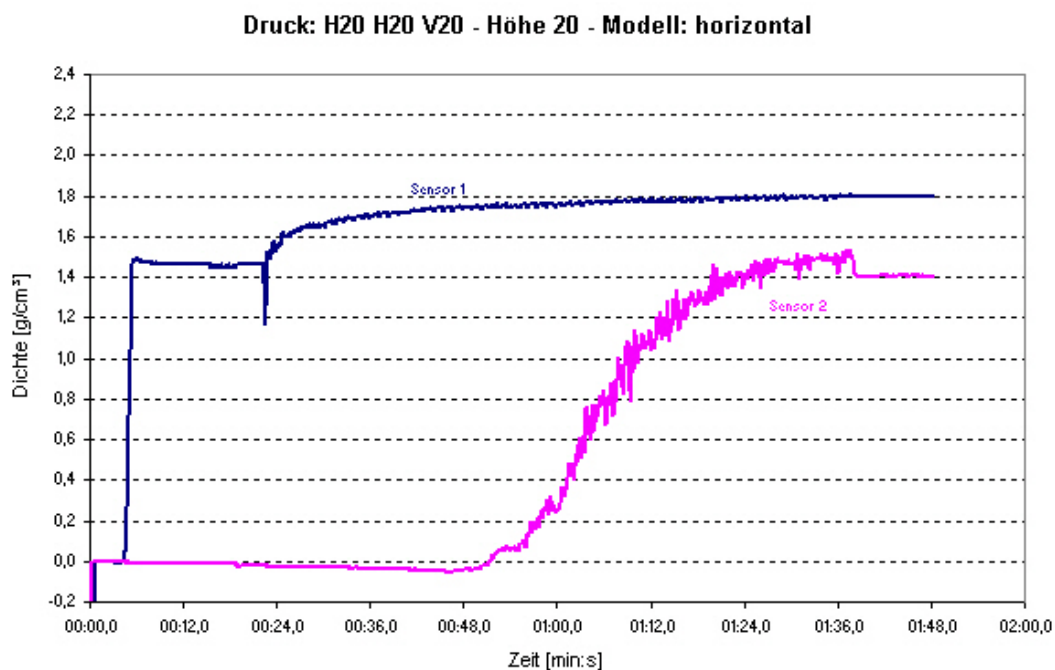
Um nun die statistische Sicherheit der vorgesehenen Versuchsreihen zu überprüfen, wurden in der waagerechten und in der senkrechten Einformlage je 5 Versuche auf dem Hauptniveau durchgeführt. Für die Hohlraumbefüllung wurden für den Innensensor (**2**) bei horizontaler

Lage eine Standardabweichung von 1,1 % bzw. bei vertikaler Lage eine Standardabweichung von 2,9 % ermittelt.

Gemäß dem 2<sup>4</sup>-Versuchsplan wurden die 16 verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten, dem oberen Niveau +1,0 bzw. unterem Niveau –1,0 entsprechend und mit den der **Tabelle 10** zu entnehmenden Werten, nach einem speziellen Schema für das Grafikprogramm „Statgraphics“, dass der statistischen Versuchsauswertung diene, zusammen gestellt. Die Reihenfolge bei der Versuchsdurchführung erfolgte jedoch stets nach dem Zufallsprinzip.

### 5.3.3.1. Waagerechte Einformlage

Die Auswertung der einzelnen Versuche zeigt in den Kurvenverläufen, dass das Segment für die statistische Versuchsplanung gut gewählt wurde. Denn die Ergebnisse der Hohlraumbefüllung (Sensor 2) reichen vom Schüttdichte-Niveau (**Bild 94**), dabei waren alle vier Variable auf –1,0 eingestellt, bis zur maximal möglichen Verdichtung (**Bild 95**) bei einer Variableneinstellung von +1,0. Der maximale Dichtewert des durch dreiaxiale Vibration verdichteten Quarzsandes beträgt an einer für die Verdichtung unproblematischen Modellpartie (Sensor 1)  $\rho = 1,8 \text{ g/cm}^3$ . Dieser Wert verleiht den Quarzsandkörnern eine solche Stabilität, das weder ein Einbrechen der Formwandung noch eine Penetration des flüssigen Metalls in die Poren zu

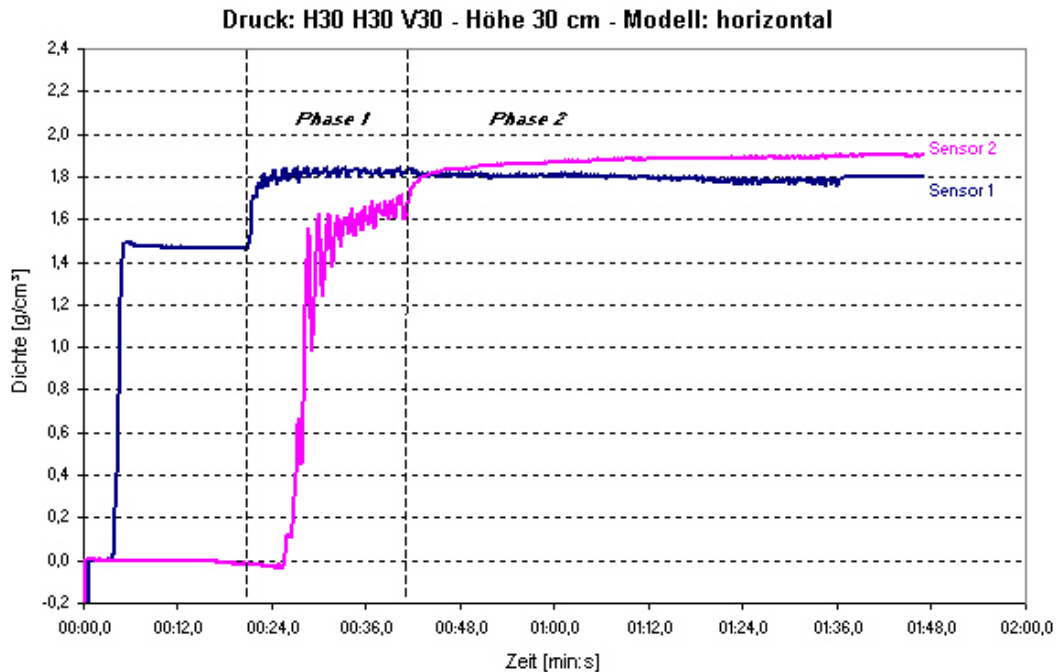


**Bild 94: Waagerechte Einformlage 1**

befürchten sind. Dabei ist zu beachten, dass dieser Dichtewert durch Beschleunigungen er-



reicht wurde, die knapp über der Erdbeschleunigung (horizontal) bzw. 2 g (vertikal) liegen und so eine nur geringe mechanische Beanspruchung der Schaumstoffmodelle auftritt. Unter diesen Bedingungen wird ein horizontal liegender Kanal (130 mm Länge und 40 \* 40 mm<sup>2</sup> Grundfläche) bis auf den Wert der Schüttdichte ( $\rho = 1,5 \text{ g/cm}^3$ , siehe Sensor 2) gefüllt.



**Bild 95: Waagerechte Einförmige 2**

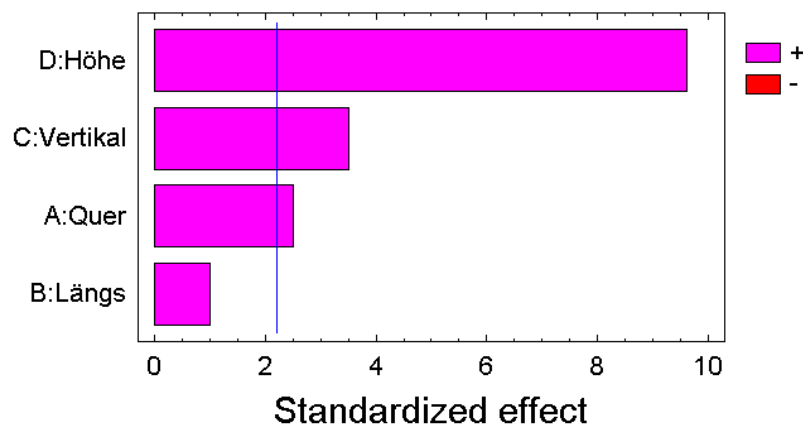
Das Einstellen des maximalen Dichtewertes auch in dieser für die Verdichtung problematischen Modellpartie lässt sich durch das Anheben der Frequenzen und der Einförmhöhe auf das jeweils obere Niveau erreichen (**Bild 95**). Bei der mechanischen Modellbeanspruchung wird sicherlich ein Grenzbereich tangiert, da die Beschleunigung den Wert von 4 g leicht überschreitet. Die Verdichtungskurve (Sensor 2) macht eine deutliche Abgrenzung der Füll- von der anschließenden Verdichtungsphase sichtbar, d. h., 1. der Hohlraum ist vollständig mit Formsand gefüllt und 2. dieser Sand ist bis in die hinterste obere Ecke maximal verdichtet.

Das **Bild 95** liefert ein wichtiges Indiz dafür, wie der Befüll- und Verdichtungsprozess im Hohlraum mit großer Wahrscheinlichkeit abläuft. Zuerst rieselt der Sand mit dem Einfüllvorgang in den Hohlraum, erreicht eine bestimmte Bodenbedeckung in Abhängigkeit vom Schüttwinkel und verschließt den Öffnungsquerschnitt. Zu Beginn der Vibration „rutscht“ der Sand am Boden relativ schnell nach hinten, während er an der „Oberkante“ langsamer nachschiebt. Wenn der Quarzsand die Oberfläche des Sensors erreicht, erkennt man ein Ansteigen der Dichtewerte. Die Sandfront bewegt sich an der oberen „Kante“ Wellen förmig vorwärts (bei insgesamt steigender Tendenz) oder auf der Stelle (beim Pendeln um einen Dichtewert).

Im Bereich der Sandfront erreicht die Dichte im „Wellenberg“ den maximal möglichen Wert der Verdichtung, der dem im Außenbereich gemessenen Dichtewert entspricht. Mit dem Erreichen der hinteren oberen Ecke ist der Füllvorgang (**Bild 95**) nach ca. 21 s Vibrationsdauer abgeschlossen und ein weiteres Nachschieben des Formsandes führt zum Anstieg der Dichte auf das Niveau des Außenbereiches.

Für die Gesamtbewertung des Befüllungs- und Verdichtungsverhaltens in der waagerechten Einformlage und die Ermittlung der Abhängigkeiten der erzielbaren Dichtewerte von den horizontalen bzw. vertikalen Erregungen und den Einformhöhen wurden die nach einer Vibrationsdauer von 60 s im Hohlraum erreichten Werte in das Schema (**Pkt. 5.3.3. Statistische Versuchsplanung und -durchführung**) eingefügt. Die Zeit wurde nicht von ungefähr festgelegt, da in der industriellen Fertigung Vibrationszeiten bis zu 1 min nicht unüblich sind. Zur mathematischen Beschreibung der Dichteveränderung wurde auf der Basis der Datensätze und der rechentechnischen Auswertung des Versuchsplanes folgende Regressionsgleichung aufgestellt:

$$\rho = 1,6 + 0,03125 * x_1 + 0,0125 * x_2 + 0,04375 * x_3 + 0,12 * x_4 \quad (19)$$



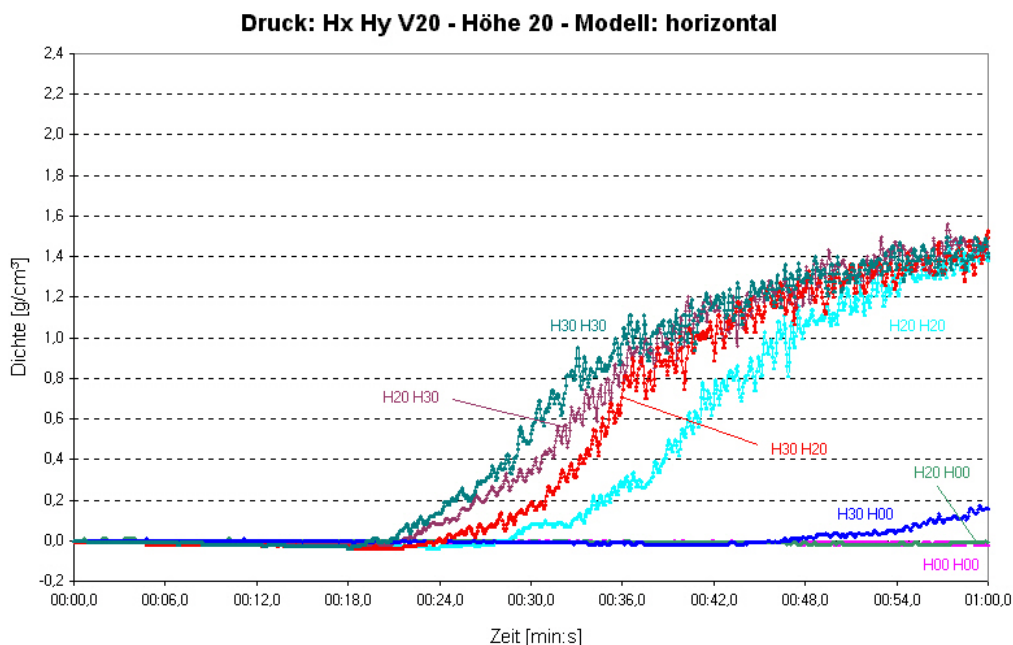
**Bild 96: Pareto-Diagramm – waagerechte Einformlage**

In dem Pareto-Diagramm (**Bild 96**) wird die Aussage der Formel (19), dass eine Veränderung der Einformhöhe den mit Abstand größten Einfluss auf den sich einstellenden Dichtewert hat, anhand der Balkengröße verdeutlicht. Der Höhenbalken ist z. B. ca. 2,5 x so lang wie der der vertikalen Erregung und entspricht in etwa ihrem Parameterverhältnis. Noch geringer ist der Einfluss der Erregung quer zur Hohlraumlängsachse, aber beide Vibrationsrichtungen liegen noch oberhalb der (blauen) Signifikanzlinie (**Bild 96**). Unterhalb dieser Linie liegt die Erregung längs der Hohlraumachse, sie hat keinen signifikanten Einfluss auf die sich einstellende

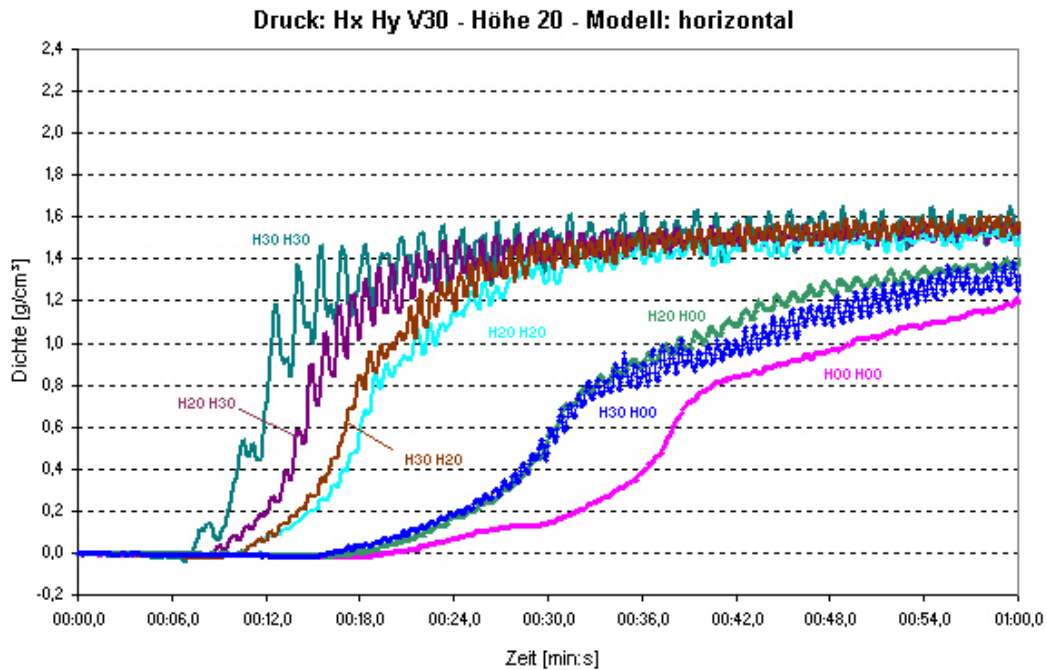
Dichte. Dennoch kann daraus nicht geschlussfolgert werden, dass auf Grund dessen diese Vibrationsrichtung bedeutungslos ist und deshalb einfach weggelassen werden kann.

Um nun herauszufinden, ob auf Grund der ermittelten Faktoren eine weniger und/oder nicht signifikante Einflussgröße bei der Vibration vernachlässigt werden kann, wurden entsprechende Versuche ohne Längs- und ohne/mit Quervibration durchgeführt. Die Auswertung erfolgte im Vergleich mit den in der statistischen Versuchsreihe ermittelten Werten, dabei wurden die jeweils gleichen Vertikalvibrationen und Einformhöhen in einem Diagramm zusammengefasst, d. h., zum Beispiel vertikal 2,0 bar (32,7 Hz) und 20 cm (**Bild 97**).

Bei der vertikalen Erregung von 2,0 bar (32,7 Hz) und der Einformhöhe von 20 cm (jeweils „-1,0“) wird deutlich, dass hier ohne eine Quer- und Längserregung (H00H00) eine messbare Hohlraumbefüllung innerhalb des betrachteten Zeitfensters nicht stattfindet. Eine zusätzliche Quererregung allein (H20H00 bzw. H30H00) bringt **keinen** oder nur einen **geringen** Anstieg, erst mit der Hinzunahme der Längserregung werden besser auswertbare Kurven erzielt. Bei der Erhöhung längs (von „-1,0,, auf „+1,0“) beginnt die Befüllung eher und die Erhöhung quer erbringt einen schnelleren Anstieg, um letzt endlich dem Wert 1,4 ... 1,5 g/cm<sup>3</sup> zuzustreben.



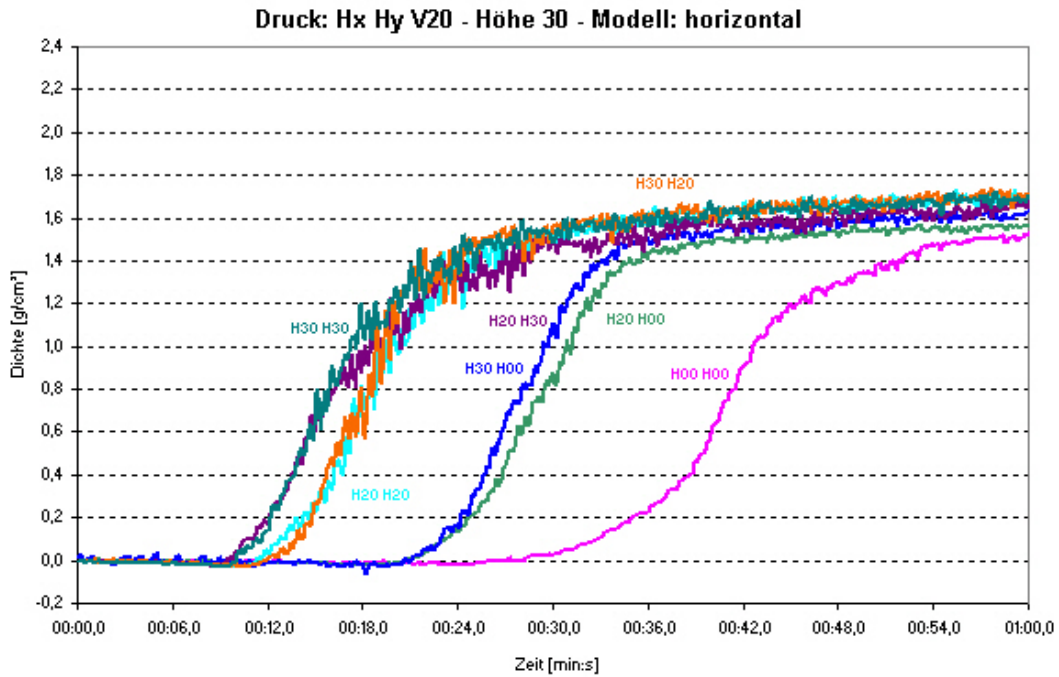
**Bild 97: vertikale Erregung – 2,0 bar (32,7 Hz) / Einformhöhe 20 cm**



**Bild 98: vertikale Erregung – 3,0 bar (36,3 Hz) / Einformhöhe 20 cm**

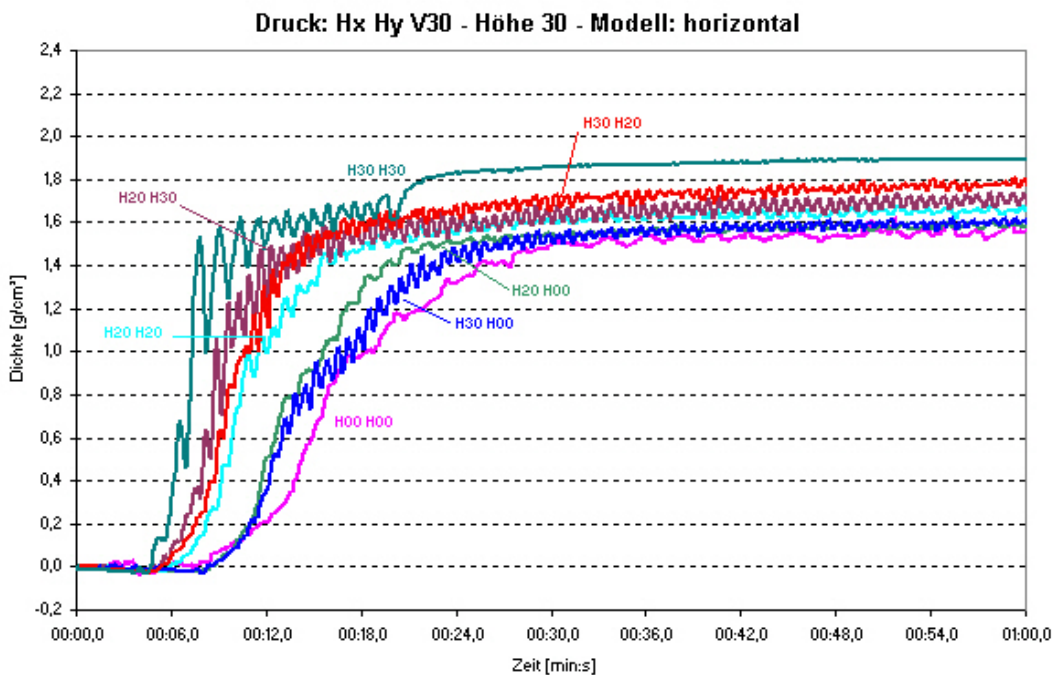
Der signifikante Einfluss der vertikalen Vibration wird bei der Erhöhung der Erregerfrequenz auf 36,3 Hz (3,0 bar) sichtbar (**Bild 98**), bei ausschließlich vertikaler Erregung (**H00H00**) setzt nach knapp 20 s die messbare Befüllung ein und nach 60 s wird ein Wert von ca. 1,2 g/cm<sup>3</sup> erreicht. Bei Hinzunahme der Quererregung (**H20H00** bzw. **H30H00**) steigen die Kurven steiler an und erreichen letzt endlich 1,3 ...1,4 g/cm<sup>3</sup>, die zusätzliche Längserregung bringt einen noch zeitigeren Beginn der Befüllung (um ca. 10 s) und einen steileren Anstieg sowie einen Endwert von ca. 1,6 g/cm<sup>3</sup>.

Bei der Einformhöhe von 30 cm und der Frequenz von 32,7 Hz (2,0 bar) (**Bild 99**) setzt bei der ausschließlich vertikalen Erregung (**H00H00**) die messbare Befüllung nach knapp 30 s ein, um danach relativ steil anzusteigen und um nach 60 s einen Dichtewert von knapp 1,6 g/cm<sup>3</sup> zu erreichen. Die zusätzliche Quererregung (**H20H00** bzw. **H30H00**) führt dazu, dass die Befüllung bereits nach ca. 21 s beginnt, etwas steiler ansteigt und einen um 0,1 g/cm<sup>3</sup> höheren Wert anstrebt. Die Hinzunahme der Längserregung hat einen Beginn der Befüllung nach reichlich 10 s und eine weitere Steigerung des Endwertes um 0,1 g/cm<sup>3</sup> zur Folge.



**Bild 99: vertikale Erregung – 2,0 bar (32,7 Hz) / Einformhöhe 30 cm**

Bei der Erregerfrequenz von 36,3 Hz (3,0 bar) und der Höhe von 30 cm (**Bild 100**) liegen die Kurvenverläufe relativ nahe beieinander, die ausschließlich vertikale Erregung (**H00H00**) liefert wiederum die untere Begrenzung mit einem Endwert von ca. 1,6 g/cm<sup>3</sup> bei 60 s. Die zusätzliche Quererregung (**H20H00** bzw. **H30H00**) bringt allein keine nennenswerte Zunahme,



**Bild 100: vertikale Erregung – 3,0 bar (36,3 Hz) / Einformhöhe 30 cm**

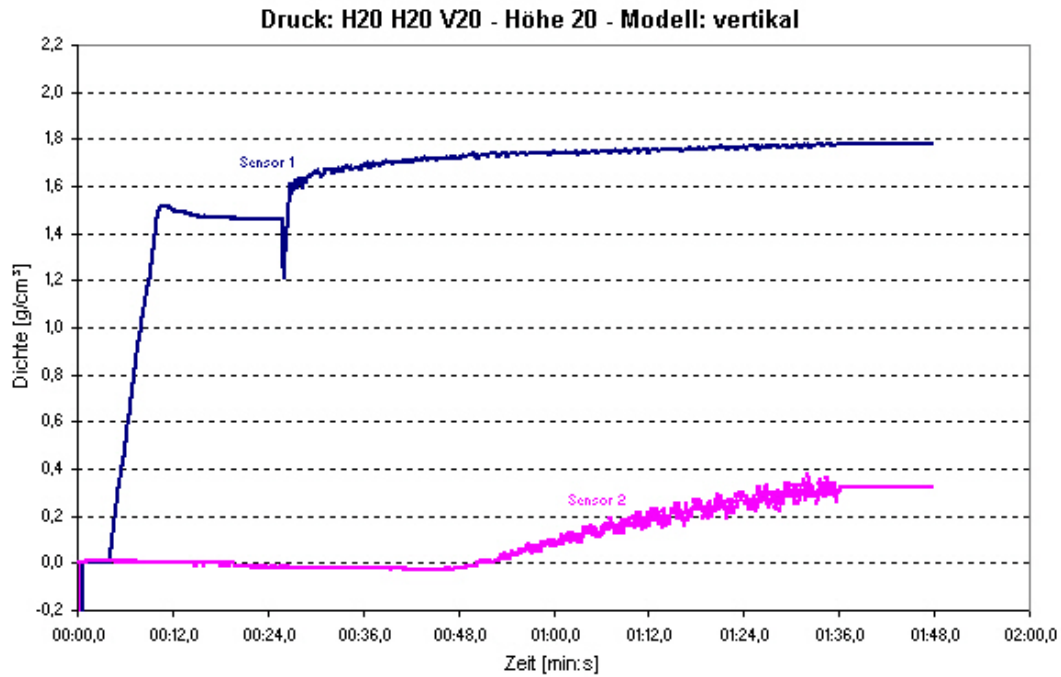
die zusätzliche Längserregung führt zu steileren Anstiegen und Endwerten von ca. 1,7 bis 1,8 g/cm<sup>3</sup>. Hervorzuheben ist hier jedoch der Kurvenverlauf mit der höchsten Quer- und Längserregung (**H30H30**), der die Kurvenschar nach oben abgrenzt und nach einem unruhigem Beginn nach ca. 20 s Vibrationszeit relativ rasch die Enddichte von ca. 1,9 g/cm<sup>3</sup> erreicht.

Beim Vergleich der vier Diagramme untereinander (**Bilder 97 – 100**) ist der Höheneinfluss augenscheinlich nicht zu übersehen, er bildet bei der „+1,0“-Einformhöhe (30 cm) die Basis für Dichten von 1,5 g/cm<sup>3</sup> und mehr (nach 60 s Vibrationsdauer). Die Vertikalvibration zeigt bei zunehmender Erregung einen zeitigeren Beginn der Hohlraumfüllung (Verdichtung) und die letzt endlich höheren erzielbaren Dichtewerte. Bemerkenswert ist außerdem, dass bei den Versuchen ohne Längs- und Quererregung die Kurven stets unterhalb der der anderen Versuche liegen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass neben der Dominanz des Höheneinflusses die im Pareto-Chart ermittelte Signifikanz der Vertikal- und Quererregung bestätigt wird. Die Längsvibration bringt im Allgemeinen einen zeitigeren Beginn der Befüllung, ohne jedoch einen sichtlichen Beitrag zu einem höheren Endwert zu leisten, deshalb ist sie nicht signifikant. Die Längserregung liefert dennoch einen wichtigen Beitrag zur Hohlraumbefüllung, auf dessen Basis die beiden anderen aufbauend die Verdichtung bewirken. Der Sand wird mit der Bewegung in Achsrichtung mitgenommen, d. h., in den Hohlraum hinein und mit dem Rückschwung wieder heraus bewegt, so dass mit dieser Erregungsrichtung (allein) nur maximale Dichtewerte auf Schüttdichteniveau zu erwarten sind. Und ohne (mindestens) eine quer zu dieser Hohlraumachse wirkende Vibration findet die gewünschte Verdichtung nicht statt.

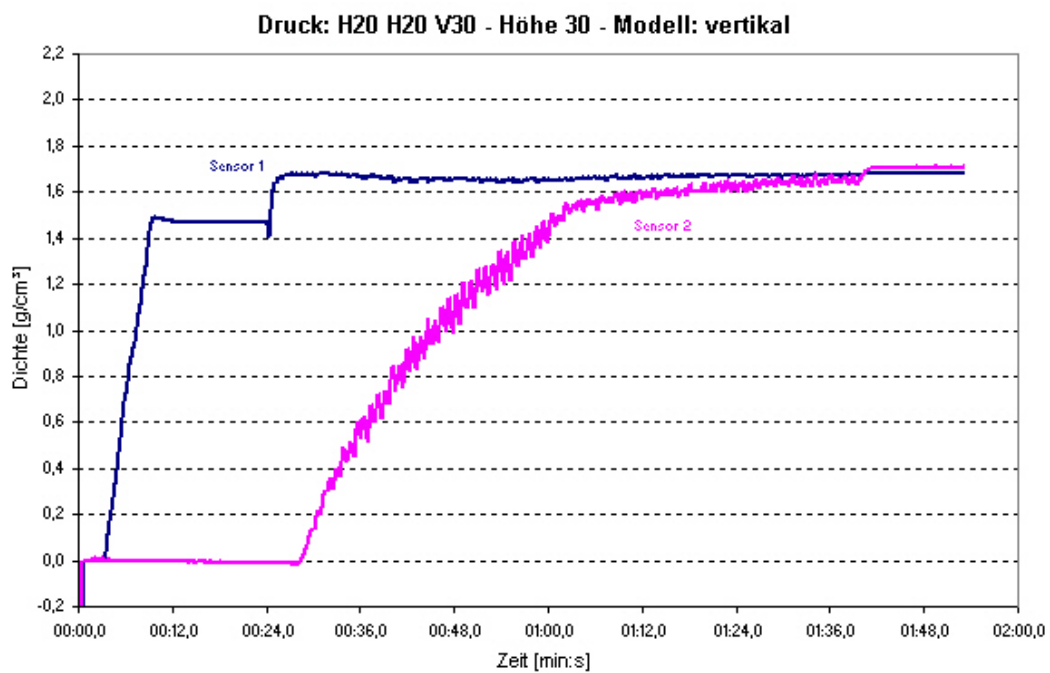
#### **5.3.3.2. Senkrechte Einformlage**

Auch bei dieser Anordnung wird an den Modellpartien, die unproblematisch für die Verdichtung des Quarzsandes sind, ein Dichtewert von  $\rho = 1,8 \text{ g/cm}^3$  (**Bild 101**, Sensor 1) erreicht, der eine ausreichende Stabilität des Quarzsandes gewährleistet. Das Befüllen einer Öffnung, in die der Quarzsand entgegen der Schwerkraft transportiert werden muss, lässt sich mit den minimalen Frequenzwerten der quer, längs und vertikal wirkenden Schwingungen sowie bei geringer Einformhöhe, d. h., alle transformierte Variable haben den Wert „-1,0“, nicht realisieren (**Bild 101**, Sensor 2). Durch die Steigerung der vertikalen Frequenz auf den oberen Wert („+1,0“) und das Anheben der Einformhöhe auf 30 cm kann in einer vertikal liegenden Vertiefung mit 90 mm Länge und  $40 * 40 \text{ mm}^2$  Grundfläche ein Dichtewert erzielt werden, der dem Wert der unproblematischen Verdichtung äquivalent ist (**Bild 102**).



**Bild 101: Senkrechte Einfeldlage 1**

Für die Gesamtbewertung des Befüllungs- und Verdichtungsverhaltens in der senkrechten Einfeldlage und die Ermittlung der Abhängigkeiten der erzielbaren Dichtewerte von den horizontalen bzw. vertikalen Erregungen und den Einfeldhöhen wurden wie unter **Pkt. 5.3.2.1. Waagerechte Einfeldlage** die Dichtewerte in das Schema eingefügt. Und auf der Basis der

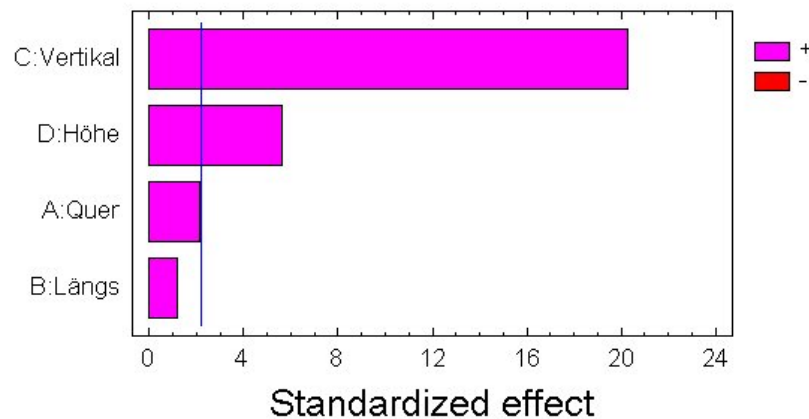


**Bild 102: Senkrechte Einfeldlage 2**



Datensätze und der rechentechnischen Auswertung des Versuchsplanes wurde folgende Regressionsgleichung zur mathematischen Beschreibung der Dichteveränderung aufgestellt:

$$\rho = 0,935 + 0,0525 * x_1 + 0,02875 * x_2 + 0,495 * x_3 + 0,1375 * x_4 \quad (20)$$

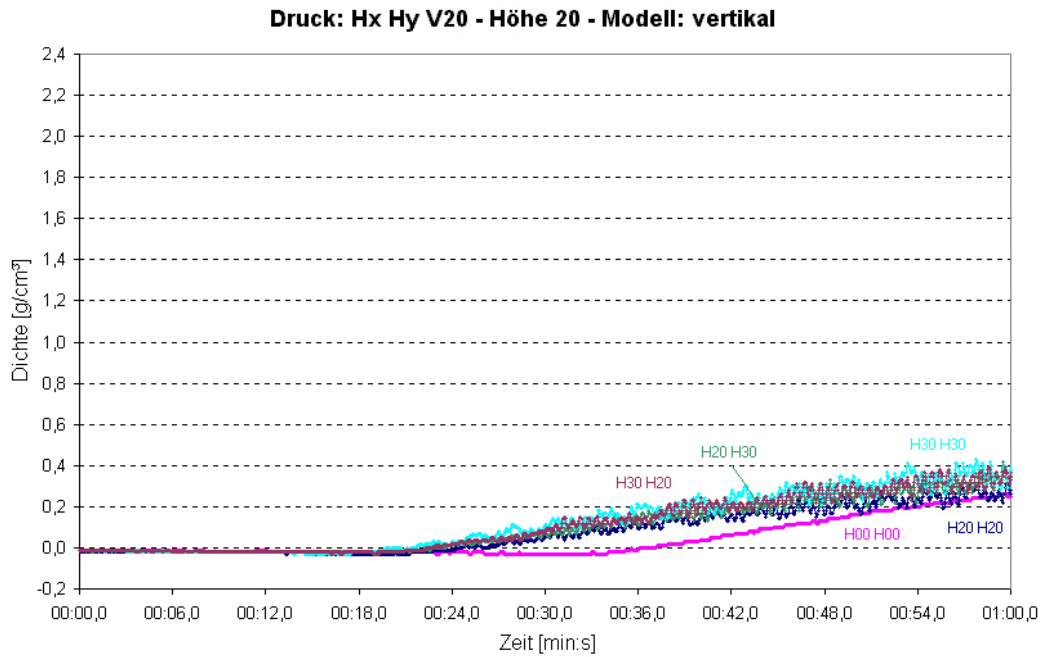


**Bild 103: Pareto-Diagramm – senkrechte Einformlage**

Anhand der Balkengröße im Pareto-Diagramm (**Bild 103**) wird die Aussage der Formel veranschaulicht, dass eine Veränderung der vertikalen Erregung den mit Abstand größten Einfluss auf den sich einstellenden Dichtewert hat. Der Balken „vertikal“ ist z. B. ca. 3,5 x so lang wie der der (Einform-), „Höhe“ und entspricht in etwa ihrem Parameterverhältnis. Noch geringer ist der Einfluss der horizontalen (1 – quer, 2 – längs) Erregungen, die hier in dieser Einformlage beide quer zur Hohlraumlängsachse schwingen, beide Vibrationsrichtungen liegen unterhalb der (blauen) Signifikanzlinie (**Bild 103**), wobei die Quererregung die Linie leicht tangiert. Da jedoch der Abstand der horizontalen Erregungseinflüsse untereinander wesentlich geringer als der zum Höheneinfluss ist, haben sie dennoch nur einen geringen, keinen signifikanten Einfluss auf die sich einstellende Dichte. Dennoch sollte hieraus ebenfalls nicht vorschnell geschlussfolgert werden, dass auf Grund dessen diese Erregungsrichtungen bedeutungslos sind und deshalb einfach weggelassen werden können.

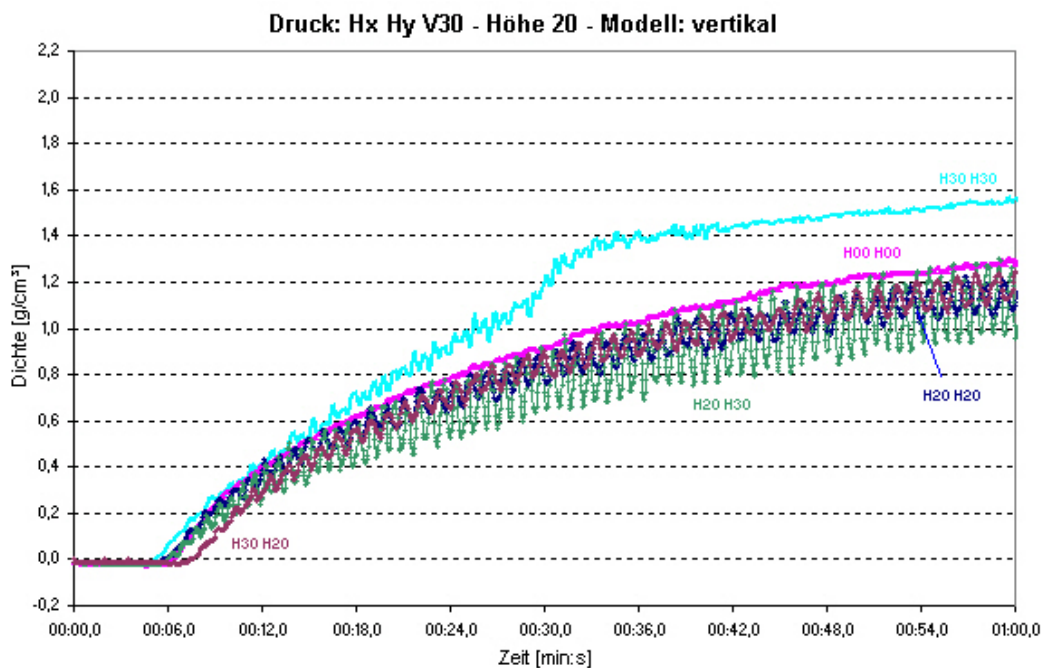
Auch in der senkrechten Einformlage wurden wiederum Vergleichsversuche ohne Längs- und Quervibration durchgeführt, um herauszufinden, ob auf Grund der ermittelten Faktoren eine oder beide nicht signifikante Einflussgrößen bei der Vibration vernachlässigt werden können. Die Auswertung erfolgte im Vergleich mit den in der statistischen Versuchsreihe ermittelten Werten, wobei die jeweils gleichen Vertikalerregungen und Einformhöhen in einem Diagramm zusammengefasst wurden.





**Bild 104: vertikale Erregung – 2,0 bar (32,7 Hz) / Einformhöhe 20 cm**

Bei der vertikalen Erregung von 2,0 bar (32,7 Hz) und der Einformhöhe von 20 cm (jeweils „-1,0“) im **Bild 104** wird indirekt sichtbar, dass die hier in Achsrichtung wirkende vertikale Erregung eine dominante Rolle spielt. Ohne die Quer- und Längserregung (**H00H00**) beginnt die messbare Hohlraumbefüllung nach einer Vibrationsdauer von ca. 35 s, um dann nach 60 s einen Dichtewert von ca. 0,3 g/cm<sup>3</sup> zu erreichen. Die Hinzunahme der beiden horizontalen

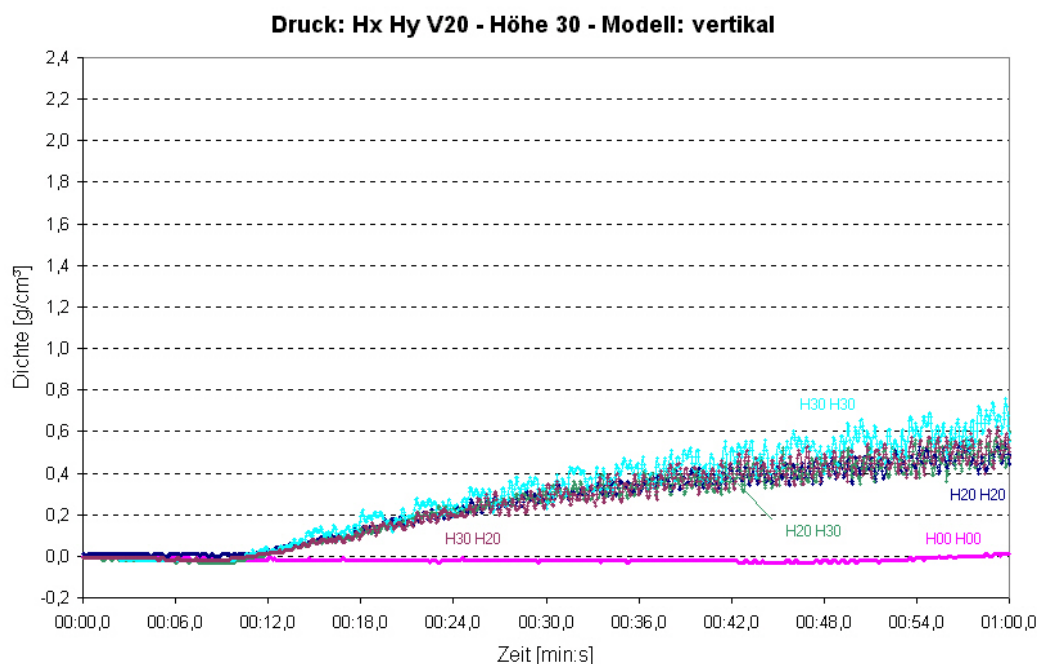


**Bild 105: vertikale Erregung – 3,0 bar (36,3 Hz) / Einformhöhe 20 cm**

bringt einen um 12 s zeitigeren Beginn der Befüllung, aber der erreichte Wert beträgt nach 60 s Vibrationsdauer auch nur 0,3 ... 0,4 g/cm<sup>3</sup>.

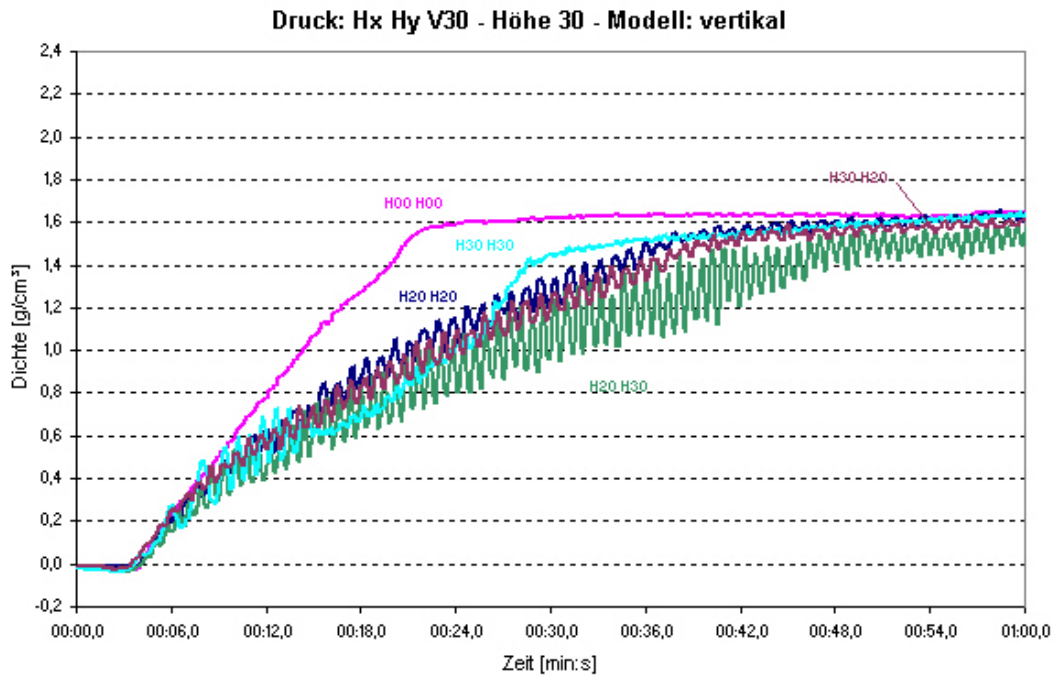
Der dominierende Einfluss der vertikalen Vibration wird bei der Erhöhung der Erregerfrequenz auf 36,3 Hz (3,0 bar) deutlich (**Bild 105**), da bei ausschließlich vertikaler Erregung (**H00H00**) nach knapp 8 s die messbare Befüllung einsetzt und nach 60 s ein Wert von ca. 1,3 g/cm<sup>3</sup> erreicht wird. Die Hinzunahme der beiden horizontalen Vibrationsrichtungen führt nur zu einem höheren Endwert (ca. 1,6 g/cm<sup>3</sup>) nach 60 s Vibrationsdauer, wenn in beiden Richtungen die „+1,0“-Variante (**H30H30**) zur Anwendung kommt. In den anderen drei Varianten verlaufen die Kurven unterhalb und erreichen Endwerte von ca. 1,0 ... 1,2 g/cm<sup>3</sup>.

Bei der Einformhöhe von 30 cm und der Frequenz von 32,7 Hz (2,0 bar) (**Bild 106**) setzt bei der ausschließlich vertikalen Erregung (**H00H00**) die messbare Befüllung mit großer Wahrscheinlichkeit erst außerhalb des betrachteten Zeitfensters ein. Die Hinzunahme der Längs- und Quererregungen führen zu einem relativ frühen Befüllungsbeginn nach ca. 10 s, allerdings werden nach der Vibrationsdauer von 60 s nur ca. 0,4 ... 0,7 g/cm<sup>3</sup> erreicht.



**Bild 106: vertikale Erregung – 2,0 bar (32,7 Hz) / Einformhöhe 30 cm**

Bei der Erregerfrequenz von 36,3 Hz (3,0 bar) und der Höhe von 30 cm (**Bild 107**) liegen die Kurvenverläufe relativ nahe beieinander, die ausschließlich vertikale Erregung (**H00H00**) liefert die obere Begrenzung mit einem Endwert von etwas über 1,6 g/cm<sup>3</sup>, der bereits nach ca. 30 s erreicht wird. Die Hinzunahme der Längs- und Quererregungen dämpfen den Anstieg der



**Bild 107: vertikale Erregung – 3,0 bar (36,3 Hz) / Einformhöhe 30 cm**

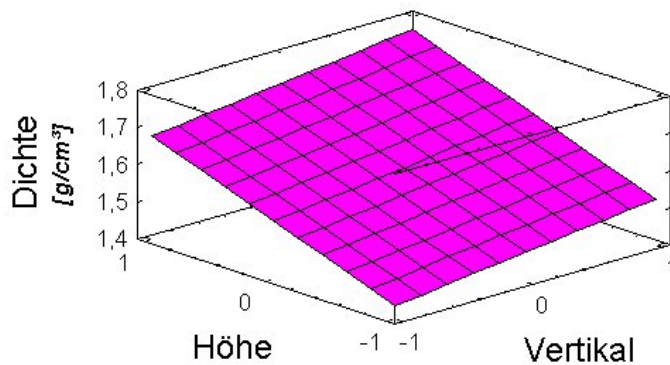
ebenfalls nach ca. 4 s beginnenden messbaren Befüllung, nach einer Vibrationsdauer von 60 s werden Dichtewerte von ca. 1,5 ... 1,6 g/cm<sup>3</sup> erzielt.

Beim Vergleich der vier Diagramme untereinander (**Bilder 104 – 107**) ist der dominierende Einfluss der vertikalen Erregung offenkundig, der im Vergleich zu den anderen Variablen zum Teil erdrückend erscheint und den signifikanten Höheneinfluss insbesondere bei der ausschließlich vertikalen Erregung teils negiert. Ansonsten liefert die Veränderung der Höhe von „•1,0“ nach „+1,0“ bei den Versuchen **mit** Längs- und Quererregungen um 0,2 ... 0,3 g/cm<sup>3</sup> höhere Dichtewerte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass neben der Dominanz des Einflusses der vertikalen Erregung die im Pareto-Chart ermittelte Signifikanz des Höheneinflusses bestätigt wird. Die Beeinflussung durch die beiden horizontalen Vibratoren ist bis auf die Ausnahme bei 2,0 bar (32,7 Hz) und 30 cm Höhe, bei dem diese den fehlenden vertikalen Anteil „übernehmen“, gering. Bei gleicher Einformhöhe und 3,0 bar (36,3 Hz) „bremsen“ die horizontalen Erregungen den Hohlraumfüllprozess, so dass man bei dieser Kombination die Horizontalen nicht bräuchte. In den anderen drei Varianten sollte jedoch auf den, wenn auch teils geringen, Beitrag der horizontalen Vibratoren zur Hohlraumbefüllung nicht verzichtet werden.

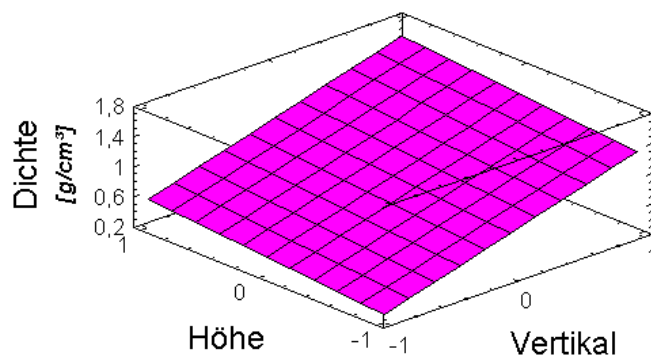
### 5.3.3.3. Zusammenfassung

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt neben den Unterschieden im Detail bei der waagerechten bzw. senkrechten Einformlage einen dominanten Einfluss der Schwerkraft auf das Befüllungs- und Verdichtungsverhalten eines Hohlraumes. Dieser ergibt sich beim Befüllen durch die Gewichtskraft des Quarzsandes und der vertikalen Erregung des Vibrations-tisches. Dabei überwiegt die Masse der Sandsäule beim Befüllen eines waagerechten Kanals



**Bild 108: Dichte in Abhängigkeit signifikanter Einflussgrößen – waagerechte Einformlage**

(Bild 108), während beim Befüllen einer Öffnung entgegen der Schwerkraft die vertikale Schwingungserregung dominiert (Bild 109). Die horizontalen Schwingungen unterstützen die



**Bild 109: Dichte in Abhängigkeit signifikanter Einflussgrößen – senkrechte Einformlage**

Verringerung der Reibungskontakte, so dass eine größere Beweglichkeit der Körner gegeben ist. Auf diese Weise können mit Hilfe der dreiaxialen Vibration Dichtewerte des Quarzsandes erreicht werden, die der Form eine hohe Stabilität und ausreichenden Widerstand gegen das Penetrieren des flüssigen Metalls in die Sandschichten verleihen. Wenn man eine derart hohe Druckbelastung realisieren kann, dann steht dem gegenüber auch gleich die Gefahr des Verzuges der Schaumstoffmodelle. Deshalb macht sich eine entsprechende Optimierung erforderlich.

## 6. Fazit und Ausblick

Wie die Versuchsergebnisse dieser Arbeit eindrucksvoll belegen, hat sich die räumliche Herangehensweise (s. **Pkt. 5. 3–D–Vibration**) an die Problematik der Befüllung von Modellhohlräumen und –hinterschneidungen sowie der Formsandverdichtung beim Lost–Foam–Prozess prinzipiell als richtig erwiesen, auch wenn letzt endlich einige Fragen noch unbeantwortet geblieben sind bzw. neue sich ergeben haben, die noch einer Lösung zugeführt werden müssen.

So hat es sich gezeigt, dass für die Füllung eines horizontal orientierten Hohlraumes die Vibration in seiner Längsachse eine große Bedeutung besitzt, a b e r *ohne* die quer zu dieser Achse eingeleiteten Vibrationen (horizontal–quer **und** vertikal) *keine* nachhaltige Befüllung stattfindet, d. h., der Formsand wird im Hohlraum mehr oder weniger nur hin und her bewegt. Und erst in der Kombination der drei Vibrationsrichtungen werden im Hohlraum Dichtewerte des Quarzsandes erreicht, die ihm eine hohe Stabilität und ausreichend Widerstand gegen das Penetrieren des flüssigen Metalls in die Sandschichten verleihen (**Pkt. 5.3.3.1. Waagerechte Einformlage**). Bei nur zweiaxialer Vibration (oder in einer Richtung) konnten solche Dichtewerte nicht erzielt werden, teilweise verharrten die Werte auf dem „Null“-Niveau (**Bild 97**).

Im Pareto–Diagramm (**Bild 96**) stellt sich der Zusammenhang, scheinbar in Widerspruch zu dieser Aussage, anders dar, in dem die Erregung längs der Hohlraumachse keinen signifikanten Einfluss auf die sich einstellenden Dichtewerte besitzt. Dies ist im Wesentlichen der Tatsache geschuldet, dass die Hin- und Herbewegung des Formsandes einfach vom Sensor nicht mit erfasst wird, weil er im Hohlraum am oberen hinteren Ende angebracht wurde, um das „Ende“ des Hohlraumbefüllungs- und Verdichtungsprozesses messen zu können, d. h., wann der Hohlraum vollständig gefüllt ist und der Formsand die gewünschten Dichtewerte, wie im vorangegangenen Absatz beschrieben, erreicht hat.

Für die Erzielung eines optimalen Befüllungs- und Verdichtungsverhaltens werden also alle drei axialen Vibrationsrichtungen mit ihren voneinander unabhängigen Frequenzen und Amplituden benötigt, die Frage nach der optimalen Vibrationsrichtung ist damit eindeutig beantwortet, es gibt sie definitiv nicht! Die Untersuchungsergebnisse bestätigen zweifelsfrei die aufgestellte Hypothese, dass ein komplexes Problem, das die Bewegung des Sandes im vom Formstoffbehälter begrenztem Raum nun einmal ist, auch einer komplexen Denk- und Herangehensweise bedarf, d. h., um die Gesetzmäßigkeiten, Abhängigkeiten und gegenseitigen Be-

einflussungen der Sandbewegungen in den drei Achsen des Raumes umfassend beurteilen zu können, ist es erforderlich, auch den Formstoffbehälter in diesen drei Achsrichtungen mit voneinander unabhängigen Frequenzen und Amplituden zu erregen.

Wie die unter **Pkt. 5.2.1. Ermittlung der Erregerfrequenzen ff** ausführlich beschriebenen Beschleunigungsversuche eindeutig belegen, werden die benutzten Kolbenschwinger tatsächlich unabhängig voneinander und ohne sich gegenseitig zu beeinflussen bzw. aus dem Takt zu bringen erregt. Die Ursache für dieses Verhalten der Vibratoren ist darin begründet, dass der Kolben in einem Druck dichten Gehäuse frei zwischen zwei Endpunkten in senkrechter Richtung zu seiner Befestigungsfläche schwingt. Diesem unbestrittenem Vorzug steht der Nachteil gegenüber, dass über den Druck als Regelgröße die gewünschte Frequenz, die dann noch von der in Bewegung zu versetzenden Masse abhängig ist, eingestellt werden muss. Und das zur Verfügung stehende, nutzbare Frequenzband ist deshalb leider beschränkt und beträgt beim kleinen Vibrator (unter Volllast) von 26,6 Hz (1,0 bar) bis 34,9 Hz (3,0 bar) und beim Großen (bei gleichen Bedingungen) von 28,4 Hz bis 36,3 Hz. Dieser relativ flache Kennlinienverlauf war auch ein Hinderungsgrund dafür, das Verhalten des Formsandes im Eigenfrequenz/Resonanzbereich mit dem 3–D–Tisch zu untersuchen, dafür musste auf einen Unwucht erregten Vibrationstisch zurückgegriffen werden.

Die Unwuchterregung hat den Vorzug, dass sie über die Frequenz geregelt wird und auch niedrige Werte (mit  $f \geq 0$  Hz beginnend) einstellbar sind. Wie unter **Pkt 4.2. Untersuchungen zur Eigenfrequenz** beschrieben, wurde mit dem vollen 3–D–Tisch–Behälter eine Resonanzfrequenz von 10 Hz gemessen, die aber auch dem visuellen Erscheinungsbild entsprechend damit das Schwingen des Gesamtsystems (Tisch–Behälter–Füllung) charakterisierte. Eine „Extra–Schwingung“ des Formsandes wurde nicht beobachtet. Bisher wurden Resonanzercheinungen nur bei massiven Festkörpern und homogenen Schüttgütern ermittelt. Die Einschwingversuche (**Pkt. 4.4. Untersuchungen zum Einschwingverhalten**) erbrachten den Nachweis, dass das Problem, den mit Formsand gefüllten Behälter aus der Ruhelage in Bewegung zu versetzen, ohne die allseits bekannten Einschwingeffekte mit den enormen Beschleunigungen in Kauf nehmen zu müssen, nicht wie angedacht lösbar ist. Wenn nämlich der gefüllte Behälter aus geringst möglicher Höhe auf den bereits eingeschwungenen Tisch fällt, erfährt er eine Beschleunigung, die ein Mehrfaches von dem ist, als wenn er aus der Ruhelage mit dem Tisch in Bewegung versetzt wird. Somit würden die Beschädigungen an den Modellen beim Einfüllen eher größer, denn geringer. Deshalb kann unabhängig weiterer spezieller Festlegungen zum jeweiligen Befüllungs- und Verdichtungsregime der allgemeine Hinweis

gegeben werden, möglichst zeitnah mit dem Beginn der Behälterbefüllung die Vibration „hochzufahren“. Grundsätzlich gäbe es dazu zwei Varianten, mit einer Frequenz, die sicher oberhalb der (unerwünschten) Resonanzfrequenz liegt, und einer sehr niedrigen Amplitude, die dann im Nachgang auf den erforderlichen Wert hoch geregelt wird, starten. Oder, insbesondere, wenn keine Möglichkeit der elektronischen Amplitudenregelung vorhanden ist, mit einer sehr niedrigen Frequenz beginnen und danach möglichst rasch den Resonanzbereich „durchfahren“. Der Start der Vibration mit einem, bis auf die in der heutigen Zeit üblichen Grundsicht, leerem Behälter hat auf Grund der geringeren in Bewegung zu versetzenden Masse auch noch den Vorteil, dass hier generell geringere Einschwingeffekte zu erwarten sind als bei einem voll gefülltem Behälter.

Zu den positiven Ergebnissen der im Zusammenhang mit den Einschwingversuchen durchgeführten Untersuchungen zum Fließverhalten gehören die Beobachtungen zur Pseudoverflüssigung und zum Vibrokochen, die im Wesentlichen die bisher in der Literatur /11/ beschriebenen Phänomene bestätigten. Bei den Versuchen mit dem Spalt wurde zudem beobachtet, dass die „Kochphase“ den eigentlichen „flüssigen“ Zustand des Formsandes beschreibt, indem der Sand förmlich aus dem Behälter zu fließen beginnt. Für die Befüllung von Modellhöhlräumen und –hinterschneidungen, insbesondere mit engen Querschnitten, ist diese Beobachtung von enormer Bedeutung.

Wie ein roter Faden durchzieht der dominante Einfluss der Schwerkraft auf das Befüllungs- und Verdichtungsverhalten alle diesbezüglich durchgeführten Versuche, einmal indem ihre direkte Wirkung bei der Befüllung eines senkrecht ausgerichteten Hohlraumes, der entgegen der wirkenden Schwerkraft zu befüllen ist und deren Hauptlast dabei die vertikale Vibration „trägt“, sich zeigt. Zum Anderen wird beim waagrecht orientiertem Hohlraum die indirekte Wirkung deutlich, indem die Masse der Sandsäule das so genannte „Nachdrücken“ erzeugt. Bei der senkrechten Lage hat das „Nachdrücken“ ebenfalls noch eine wesentliche Bedeutung, ist aber dort nur zweitrangig, analog wie die direkte Wirkung in der waagerechten Lage, wo die vertikale Vibration die horizontale Bewegung begünstigt, indem die Schwerkraftwirkung herab gesetzt wird. Aus der Schwerkraftdominanz nun zu schließen, dass die Erregung des Behälters allein in vertikaler Richtung das Problem der Befüllung von Hohlräumen und Hinterschneidungen löst, ist dennoch ein Trugschluss, denn bekannter Maßen sind die Grenzen der Befüllbarkeit bei einer eindimensionalen Vibration schnell erreicht (s. auch **Pkt. 4.3. Betriebliche Untersuchungen**). Mit der 3-D-Vibration konnte nun nachgewiesen werden, dass trotz des durchaus vorhandenen und mit den Versuchen auch bestätigten Schwerkraftein-

flusses die horizontalen Erregungen einen unverzichtbaren Beitrag zur Hohlraumbefüllung des Modells liefern. Auch wird damit eine höhere Qualität der erreichbaren Sandverdichtung in kürzerer Zeit erzielt; so dass festgestellt werden kann, für aussagekräftige Untersuchungen der Sandbewegungen im Vibrationsbehälter sind dreidimensionale Vibrationserregungen „Pflicht“ oder anders ausgedrückt, die „3-D-Saison“ ist eröffnet.



## Literatur

- /1/ Brown, J. R.: *The lost foam casting process*. Metals and Materials , October 1992, S. 550–555
- /2/ Bast, J.; Wenig, R.: *Vollformgießen – ein Beitrag zur Systematisierung*. Giesserei 81 (1994) Nr. 22, S. 797–802
- /3/ Eymann, J.: *Beitrag zum Vollformgießen von Aluminium in binderfreien Sand*. Dissertation, Clausthal 1997
- /4/ Shroyer, H. F.: *Cavityless Casting Mold and Method of Making same*. United States Patent Office Nr. 2.830.343, USA, 1958
- /5/ Wittmoser, A.: Ind. –Anz. 89, 1976, Nr. 33, S. 669–672
- /6/ Wittmoser, A.: *Über das Vollformgießen mit vergasbaren Modellen*, Giesserei 50, 1963, Nr. 17, S. 506–517
- /7/ Nellen, H.: DBP Nr. 1 203 390, 07.07.1960
- /8/ Smith, Tr.: US–Patent Nr. 3 157 924, 24.11.1964
- /9/ Hofmann, R.: DBP Nr. 1 301 439, 11.11.1966
- /10/ Krzyzanowski, E.: DBP Nr. 1 301 440, 03.02.1968 und Nr. 1 758 521, 19.01.1968
- /11/ Sacharuk, L.: *Transport- und Verdichtungsprozesse des Sandes beim Vollformgießen*. Dissertation, Freiberg 2001
- /12/ Stork, A.: *Formfüllmechanismen beim Lost-Foam-Gießen*. Dissertation, Clausthal 2000
- /13/ Hahn, O., Fahrig, H.–M., Siekaup, R.: *Einflußfaktoren im Hinblick auf die Oberflächenqualität von Modellen aus Polystyrolschaumstoff für das Aluminium-Vollformgießen*. Giesserei 85, 1998, Nr. 11/12, S. 45–50
- /14/ Walter, C.; Siefer, W.: *Einfluß der Gasentwicklung in kaltharzgebundenen Vollformen auf Putzaufwand und Gußfehler*. Giesserei 82 (1995), Nr.2, S. 91–95
- /15/ Lessiter, M.–J.: *Zur heutigen Technologie der Gußherstellung nach dem Lost-foam-Verfahren in den USA*. Giesserei 85 (1998) Nr. 8, Sonderdruck
- /16/ Kuhlitz, C.: *Beitrag zum Vollformgießen von Gusseisen mit Kugelgraphit in binderfreiem Sand*. Dissertation, Clausthal 1995
- /17/ Brown, J. R.; Shewfelt, T.: *Low carbon polymer: A new foam pattern material for the lost foam casting process*. AFS–Transactions 93–064 (1993), preprint
- /18/ Lui, J.; Ramsay, C. W.; Askeland, D. R.: *Effects of foam density and density gradients on metal fill in the LFC process*. AFS–Transactions 97–139 (1997), S. 435–442
- /19/ Gorla, C. A., Serramoglia, G., Caironi, G., Tosi, G.: *Coating permeability: A critical parameter of the evaporative pattern process*. AFS Transactions 86–101, 1986, S. 589–600
- /20/ Koch, C.: *Schlichten – ein feuerfester Überzugsstoff auf EPS-Modellen*. Tagungsband, VDG Düsseldorf/Paderborn 1996
- /21/ Venkataramani, R., Rivandran, C.: *Effects of coating thickness and pouring temperature on thermal response in lost foam casting*. AFS Transactions 96–93, 1996, S. 355–357
- /22/ Mehta, S., Shivkumar, S.: *Fluidity of aluminum alloys and composites in the lost foam process*. 99<sup>th</sup> Casting Congress Kansas City 1994, Missouri, USA, preprint 95–086
- /23/ Littleton, H., Miller, B., Sheldon, D., Bates, C.: *Process control for precision lost foam castings*. Foundry Management & Technology March, 1997, Nr. 2, S. 34–37
- /24/ Seeger, K.: *Lost Foam Schlichten für Aluminium und Grauguß*. Tagungsband, VDG Düsseldorf/Paderborn 1996

- /25/ Hahn, O.; Fahrig, H.-M.; Wappelhorst, M.: *Einfluß der Schlichte auf Formfüllungsmechanismen und Gussteilmerkmale beim Vollformgießen*. Gießerei-Rundschau 45 (1998) Nr. 11/12, S. 18–24
- /26/ Creed, P. S.: *Sand Fill and Compaction: Getting Them Right*. Modern Castings 1989, Nr. 11, S. 50–51
- /27/ Zhao, Q.; Gustafson, T. W.; Hoover, M.; Flemings, M. C.: *Folds Formation and Prevention in the Lost Foam Aluminum Process* AFS Transactions 2004 (Paper 04–080)
- /28/ Zhao, Q.: *Validating the Fundamental Reasons for Fold Formation in Light Alloy Castings*. General Motors Research Report, MCTWA87821, (1998)
- /29/ Walling, R. P., Dantzig, J. A.: *Mechanisms of mold filling in the expendable pattern castings process*. 98. AFS Casting Congress, Hamilton, Ontario, USA, 1994
- /30/ Fu, J.; Askeland, D. R.; Tsai, H.: *Transport of foam decomposition products into the sand in the lost foam casting process*. Castexpo '96 and 100<sup>th</sup> AFS Casting Congress, preprint 96–091
- /31/ Shivkumar, S., Gallois, B.: *Physico-chemical aspects of the full mold casting of aluminum alloys, part I: The degradation of polystyrene*. AFS Transactions 87–85, 1987, S. 791–800
- /32/ Shivkumar, S., Yao, X., Makhlof, M.: *Polymer-melt interactions during casting formation in the lost foam process*. Scripta Metallurgica et Materialia 33, 1995, Nr. 1, S. 39–46
- /33/ Yao, X., Shivkumar, S.: *Mould filling characteristics in lost foam casting process*. Materials Science and Technology, 1997, Nr. 13, S. 841–846
- /34/ Wittmoser, A., Hofmann, R.: Vortrag 2, Internationaler Gießerei-Kongress, Kyoto, 1968
- /35/ Brown, J. R.: Foundry Practice Nr. 205, 1982, S. 3–5
- /36/ Ashton, M. C., Sharman, S. G., Brookes, A. J.: *The Replicast FM (Full Mold) and CS (Ceramic Shell) Process*. Transactions of the American Foundrymen's Society 88, 1984, S. 271–280
- /37/ Easwaran, J.: *An alternate Approach to Conventional Evaporative Pattern Casting*. In: Proceedings of the Expendable Pattern Casting: Managing the Technology, AFS-Kongress, Vortrag 14, Birmingham, Alabama, USA, 1993
- /38/ Breuer, N., Garat, M.: *Suspension Arm Component w/Pressure solidified EPS Method*. In: Proceedings of the Expendable Pattern Casting: Managing the Technology, AFS-Kongress, Vortrag 12, Birmingham, Alabama, USA, 1993
- /39/ Licht, J.; Hagemann, M.; Eisenbraun, M.; Spillner, A.: *Vollformgießen nach dem Castyralverfahren – ein Beitrag zum Umweltschutz*. Giesserei 85 (1998) Nr. 9, S. 38–42
- /40/ Schaarschmidt, E.: *Vollformgießen von qualitativ hochwertigen Seriengussteilen*. Gießerei-Rundschau, 1988, Nr. 7/8
- /41/ Standke, W.: *Seriengußteilmontage nach dem Vollformgießverfahren mit Schaumstoffmodellen*. Giesserei 74, 1987 Nr. 1, S. 7–15
- /42/ Kuhlitz, C.: *Loast Foam Verfahren*. HA-Informationsdienst VOLLFORM (Nr. 1), Firmenschrift, Hüttenes-Albertus Chemische Werke GmbH, Düsseldorf, 1994
- /43/ Kuhlitz, C.: *Zum Stand der Technik des Vollformgießens von Seriengußteilen in binderfreiem Sand (Lost Foam Verfahren) am Beispiel der SATURN-Gießerei*. Gießerei 81, 1994, Nr. 22, S. 803–808
- /44/ Hunter, J. H.: *1997 Market survey of lost foam foundries*. Proceedings of the International Conference on Lost Foam, 1998, Birmingham, Alabama, USA
- /45/ Autorenkollektiv: In: *Proceedings of the Expendable Pattern Casting Technology*. Vortrag 4, September 1990
- /46/ Monroe, R. W.: *Expendable Pattern Casting*. AFS Inc., 1992

- /47/ Gorla, C. A., Magistrali, G., Serramoglia, G.: ***Recent Innovations in the Development of the „Polycast“ Evaporative Pattern Process.*** Metallurgical Science and Technology, 1986, S. 59–69
- /48/ McMellon, B. A.: ***Design and Operation of Production Lost Foam Casting Systems.*** AFS Transactions, 1988, S. 27–38
- /49/ Wegscheid, E. L.: ***Sand Vibration for the Lost Foam Process.*** AFS Transactions, 1990, S. 631–640
- /50/ Clegg, A. J.: ***Evaporative Pattern Casting – a Review of Recent Developments and Progress.*** Foundry Trade Journal, Juni 1991, S. 72–83
- /51/ Clegg, A. J.: ***Expanded-polystyrene Moulding – a Status Report.*** Foundry Trade Journal, Int. 9, 1986, Nr. 30, S. 51–69
- /52/ Nikolov, K.: ***Beitrag zur Formherstellung durch Vibrationsverdichtung beim Vollformgießen.*** Dissertation, Freiberg 1996
- /53/ Paar, T.: ***Beitrag zum Vollformgießen von Eisen- und Stahlguss.*** Giesserei 78, 1991, Nr. 21, S. 750–754
- /54/ Wilhelmi, H.: ***Stand und Technik des Vollformgießens von Serienteilen.*** Gießerei–Verlag Düsseldorf, 1988, S. 168–184
- /55/ Littleton, H., Bates, C.: ***Fill and Compaction Control.*** In: AFS Proceeding of ECP Conference, Vortrag 7, September 1993
- /56/ Medana, R.: ***Stand und Technik des Vollformgießens von Serienteilen.*** Gießerei–Verlag Düsseldorf, 1988, S. 91–116
- /57/ Schaarschmidt, E.: ***Stand und Technik des Vollformgießens von Serienteilen.*** Gießerei–Verlag Düsseldorf, 1988, S. 119–136
- /58/ Tamura, K.: ***Mass Production by Evaporative Pattern Casting Process.*** Transaction of the Japan Foundrymen’s Society 8, 1989, Nr.4, S. 2–6
- /59/ Mabilais, P., Soulier, R., Beauvais, P.: ***Moulage avec modeles en polystyrene et sable sans liant.*** Fonderie 78, Oktober 1988, S. 19–29
- /60/ <http://www.vulcangroup.com>: ***VECTOR–FLO® Compaction System***
- /61/ Autorenkollektiv: ***Taschenbuch Maschinenbau (Grundlagen)*** – Band 1 – Verlag Technik 1975
- /62/ Irretier, H.: ***Grundlagen der Schwingungstechnik 1*** (Lehrbuch) Vieweg–Verlag Braunschweig / Wiesbaden 2000
- /63/ Autorenkollektiv: ***Dubbel interaktiv 1.0 – das elektronische Taschenbuch für den Maschinenbau.*** Springer–Verlag 1999